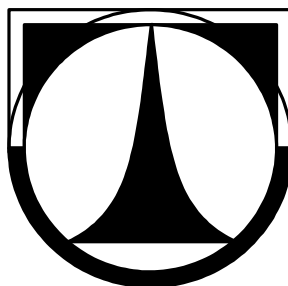


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů



Změna mechanických vlastností pevnostních plechů
po tepelném zatížení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Ondřej Porkert

2007



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Změna mechanických vlastností pevnostních plechů po tepelném zatížení

The change of strength sheets in mechanical parameters after heat load

Ondřej Porkert
KSP - TP - 784

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk Ph.D. – TU v Liberci
Konzultant diplomové práce: Ing. Jan Sláma – Škoda Auto a.s.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	71
Počet tabulek:	6
Počet příloh:	2
Počet obrázků:	26
Počet grafů	12

Datum: 4.1.2008

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství
Diplomant: Ondřej Porkert
Téma práce: Změna mechanických vlastností pevnostních plechů
po tepelném zatížení
The change of strength sheets in mechanical
parameters after heat load
Číslo DP: KSP-TP-796
Vedoucí DP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D., TU v Liberci
Konzultant: Ing. Jan Sláma, Škoda Auto a.s.

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá problematikou vlivu teplotního působení a následného BH efektu na mechanické a plastické hodnoty vyztužujících pevnostních plechů, které se používají v konstrukci karoserie automobilu a mají odolávat deformacím za vyšší rychlosti. V teoretické části jsou popsány výhody a použití jednotlivých druhů současně vyráběných materiálů včetně popisu zkoušek, které navozují skutečný průběh lisovacího procesu. V experimentální části jsou realizovány zkušební testy mechanických vlastností dvou odlišných materiálů a dle příslušných zkušebních metod je provedeno jejich vyhodnocení. U těchto materiálů byl dále zkoumán vliv historie tváření na mezní stavy výlisků. Tyto testy byly prováděny při vyšších deformačních rychlostech..

Abstract:

This thesis deals with influence of heat load and following BH-effect on mechanical and plastic parameters of strength sheets which are used for construction of automobile carosserie and should resist hight defformation speed. The teoretical part of the work focuses on advantanges and use of contemporary produced materials including the description of tests, which reveals actual course of the pressing process. The experimental part describes performed experimental tests carried out on two different materials according to relevant testing methods. Tests are evaluated in the mechanical properties terms on the basic metod as a criterion of the test results of each method. These tests were proceeded in higher deformation speed.



Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 4 ledna 2008

.....
Ondřej Porkert

.

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce ing. P. Solfronkovi Ph.D. za jeho odbornou pomoc při vypracování teoretické a experimentální části, dále za cenné připomínky a rady poskytnuté během vypracovávání zvoleného tématu. Dále bych chtěl poděkovat příslušné katedře (KSP) za poskytnutí odborných informací.



OBSAH:

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	8
1. ÚVOD.....	10
2. TEORETICKÁ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	12
2.1 Tvářitelnost a její ovlivnění obecnými činiteli.....	12
2.1.1 Stárnutí oceli.....	12
2.2 Vývoj plechů pro stavbu karoserie.....	14
2.2.1 IF oceli bez intersticií.....	16
2.3 Metody vytvrzení ocelí.....	17
2.3.1 Vytvrzení ocelí vlivem BH efektu, IF oceli s BH efektem.....	19
2.3.2 Dvoufázové a vícefázové oceli; vysokopevnostní oceli.....	23
2.3.3 DP oceli (DP – dual phase).....	23
2.3.4 TRIP oceli (transformačně indukovaná plasticita).....	24
2.3.5 CP oceli (complex phase).....	24
2.3.6 Martenzitické oceli.....	25
2.4 Hodnocení pevnostních materiálů.....	26
2.4.1 Statická zkouška tahem.....	26
2.5 Diagram mezních přetvoření (DMP).....	28
2.5.1 Obecná charakteristika diagramů mezních přetvoření.....	28
2.5.2 Podstata DMP.....	30
2.6 Základní teorie tvárného lomu.....	38
2.6.1 Křehký lom.....	38
2.7 Vliv rychlosti deformace v procesu tváření.....	38
2.8 Vztah crash-testů a pevnostních plechů a vliv na karoserie.....	40
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	44
3.1 Cíle experimentálního měření.....	44
3.2 Zjištění základních mechanických hodnot testovaných materiálů.....	46
3.3 Určení vlivu BH efektu při jednoosém zatěžování.....	48
3.4 Zkušební zařízení pro měření Diagramů mezních přetvoření.....	54



3.5. Vlastní měření DMP pro zadané materiály.....	56
3.5.1 Zjištěné křivky mezních přetvoření pro materiál DOCOL1200.....	61
3.5.2 Zjištěné křivky mezních přetvoření pro materiál DP 980.....	65
 4.	
ZÁVĚR.....	69
 5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	71
 6. SEZNAM PŘÍLOH.....	73

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Význam
A_3	$^{\circ}\text{C}$	Teplota přechodu $\text{Fe}\alpha$ na $\text{Fe}\gamma$
A_x	%	Tažnost
A_g	%	Homogenní tažnost
a, b, c	1	Regresní koeficienty
b	-	Hodnota Burgersova vektoru
BH	-	Bake Hardening
BH1	MPa	Zpevnění BH efektem
C	1/s	Intenzita rychlosti deformace
C_x, C_y, C_z	1/s	Složky rychlosti deformace
C, φ	1/s	Deformační rychlost
d	mm	Průměr tažníku
d_L	um	Vzdálenost sousedících překážek v materiálu
D	mm	Průměr vzorků
$dF1, dF2$	N	Přírůstky sil v rovině plechu
DMP	-	Diagramy mezních přetvoření
E_k	J	Kinetická energie
f_{\max}	Hz	Maximální frekvence snímání
G	MPa	Modul pružnosti ve smyku
K	MPa	Modul monotónního zpevnění
KMP	-	Křivka mezních přetvoření
KUT	%	Komplexní ukazatel svařitelnosti
l	mm	Délka dislokační čáry
L_{mez}	mm	Mezní rozměr elementu
L_i	mm	Hlavní prodloužení elementu
L_2	mm	Vedlejší prodloužení elementu
L_o	mm	Počáteční rozměr elementu
m_{φ}	1	Ukazatel stavu přetvoření
m_{σ}	1	Ukazatel stavu napjatosti
n	-	Exponent deformačního zpevnění
NbCN		Karbonitrid niobu
P_{\max}	Pa	Maximální tlak hnacího média
r	1	Koeficient normálové anizotropie
R	-	Spolehlivostní hodnota
$R_{e, (\sigma_m)}$	MPa	Mez kluzu
R_m	MPa	Smluvní mez pevnosti
$R_{p0,2}$	MPa	Smluvní mez kluzu



UH	l	Ukazatel hlubokotažnosti
v	m/s	Rychlost zatěžován
WK	MPa	Work Hardening
W	MPa	Velikost pracovního zpevnění
Z	%	Kontrakce
ZP	MPa	Zásoba plasticity
ε		Poměrné prodloužení
$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$		Skutečná logaritmická přetvoření
$\varphi_{1k}, \varphi_{2k},$		Skutečná logaritmická mezní přetvoření
φ_i		Intenzita přetvoření
s^{-1}		Deformační rychlost
v_c		Ukazatel stavu rychlosti deformace
$\bar{\sigma}$	MPa	Skutečné napětí
$\bar{\sigma}_i$	MPa	Intenzita napětí
τ	s	Čas

1. Úvod

Nové procesy výroby oceli a zlepšené metalurgické techniky dnes umožňují výrobu oceli s nejvyššími pevnostními hodnotami při dobré lisovatelnosti. Použití nových koncepcí vyráběných součástí zařízení umožňuje snižování hmotnosti jednotlivých modulů strojů a zařízení a následně pak realizaci nových postupů. Typickým zástupcem tohoto ekonomického i ekologického vývoje je postup v řešení stavby karoserie u současných automobilů. Pevnostní plechy splňují protichůdné požadavky na snižování hmotnosti karoserie a tedy i tloušťky materiálu, ale zároveň je kladen důraz na zvyšování tuhosti tzv. samonosné karoserie.

Dle hlavních směrů výzkumných a vývojových prací světových technologických center je ve výrobě karoserií používáno vysokopevných jemnozrnných ocelí a nových ultrapavysokopevných ocelí. Na tyto materiály jsou kladeny zejména technologické a funkční vlastnosti, které souvisejí i s životností vyráběných dílů.

Hospodárné použití ocelových plechů prožívá v poslední době značný vývoj. Stále více se používají vysokopevnostní ocele, které termomechanickým zpracováním dosahují vysokou mez kluzu a zvýšenou lomovou houževnatost. V oblasti výroby karoserií v automobilovém průmyslu vstupuje do popředí vývojových prací snížení hmotnosti karoserie. Probíhající soutěž vzniklá za několik posledních let mezi alternativními materiály jako je použití plastů, kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny, lehkých materiálů jako hliník nebo hořčík vyžadují stálý vývoj včetně nových výrobních technologií.

V jednotlivých částech karoserie je na tzv. karosářských výliscích zřejmý mimořádný inovační potenciál spočívající v uplatnění vícefázových ocelářských koncepcí, ke kterým patří IF oceli-(Interstitials Free Steels) s BH efektem, DP-(Dual-Phase), TRIP-(Transformation Induced Plasticity), CP-(Complex-Phase) a TMS-oceli-(Thyssen-martenzitická ocel). Uspořádání struktury těchto ocelí, jejichž pevnost je nad hodnotou 500 MPa, vede k trvale zlepšovaným tvářecím vlastnostem ve srovnání s konvenčními oceli vyšší pevnosti.

Současná výroba je v požadavcích na tvářený materiál již úspěšně zvládnuta a se známými postupy je dosahováno velmi složitých

geometrických tvarů výlisků. Se současnými trendy a designerskými požadavky je zde uvedena problematika předmětem zkoumání a zájmu zpracovatelů a výrobců plechů, kteří v souvislosti s užitnými vlastnostmi zkoumají meze možného zvyšování technologických hranic.

Vše je dáno tím, že doposud nebyla nalezena obecně použitelná metoda pro náběh nových výlisků nepravidelných tvarů a jednoznačný způsob odstranění výskytu jejich zmetkovitosti při výrobě.

U výlisků z vysokopevnostních materiálů ke značnému hlubokému tažení nedochází z hlediska plastických schopností materiálu. Tyto výlisky slouží ve stavbě karoserie jako vyztužující prvky s ohledem na tuhost celé karoserie a bezpečnost posádky. Oproti pohledovým dílům jsou téměř skryty a nejsou tak náročné na povrchovou úpravu atd. Tedy zásadním kritériem pro materiál s vysokopevnostními hodnotami z pohledu technologa je vyrobiteľnosť a zpracovatelnost dílu. Tato zpracovatelnost materiálu po výrobě je dále zkoumána z hlediska mechanických vlastností po tváření, lakování atd. z pohledu následného tepelného ovlivnění materiálu.

Předkládaná diplomová práce obsahuje hodnocení a charakteristické vlastnosti výlisků z plechu s respektováním mezních stavů přetvoření, které v širokém rozsahu stavů napjatosti zachycují Diagramy mezních přetvoření /DMP/. Souvisejícím tématem je tedy testování změny materiálových charakteristik při teplotních vlivech souvisejících s procesem výroby karoserie. Dále chování plechů a zachování mechanických hodnot při tzv. crash testech a ovlivnění tuhosti karoserie automobilů těmito materiálovými hodnotami. Při řešení otázek lisovatelnosti je využívána metoda deformačních sítí k dané analýze přetvoření. Tento postup je široce používán ve většině světových automobilek jako jsou Škoda, Ford, Hyundai. Hlavními tématy zájmu této práce jsou:

1. Materiály s vyššími pevnostními hodnotami používané při stavbě karoserie k vyztužení prahů a zjištění jejich mechanických hodnot.
2. Porovnání vlivu BH efektu na mechanické hodnoty získané z tahové zkoušky.
3. Postupy a principy DMP k určení plastických vlastností materiálu jako je např. tažnost.
4. Výstupní informace o vlastnostech řešených materiálů.

2. Teoretická část diplomové práce

2.1 Tvářitelnost a její ovlivnění obecnými činiteli

- **Chemické složení [7,9]**

V závislosti na obsahu jednotlivých prvků je ocel popisována jako slitina železa s uhlíkem a dalšími doprovodnými, případně slitinovými prvky. Tyto prvky můžeme rozdělit na škodlivé (nečistoty) např. S – síra, O – kyslík, N – dusík, P – fosfor a na prvky prospěšné Mn - mangan, Al – hliník, V – vanad, které nám váží či odstraňují část nečistot, snižují obsah dusíku a zabraňují stárnutí.

Uhlík je spolu s dusíkem považován za prvky, které nejvíce ovlivňují stárnutí oceli a proto u materiálů určených k tváření jsou hodnoty obsahu uhlíku a dusíku co nejnižší. Tedy jsou vyráběny speciální oceli s minimálním obsahem uhlíku.

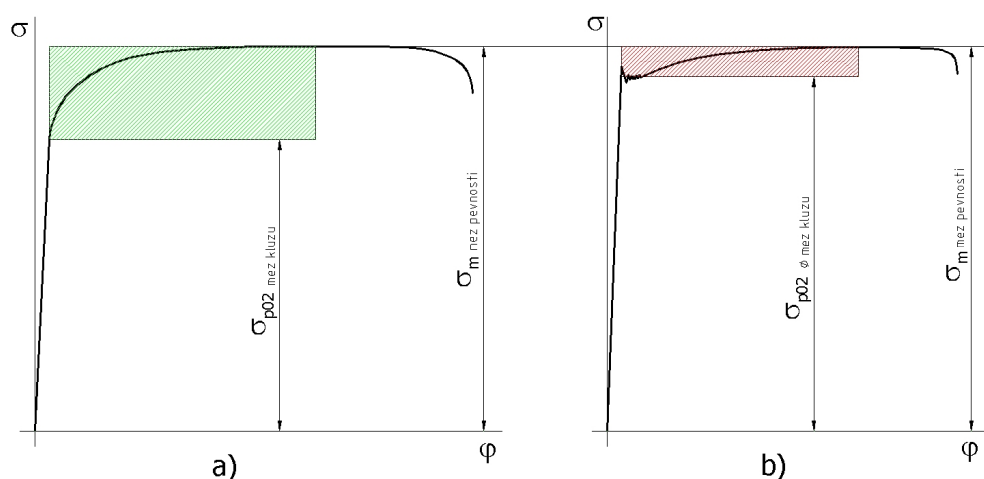
Síra tvoří se železem sulfid železnatý (FeS), který je v tuhém železe takřka nerozpustný a zhoršuje houževnatost i tvářitelnost za studena.

Dusík vytváří intersticiální tuhý roztok. Při nedostatečně pomalém ochlazování se nadbytečný dusík vylučuje ve formě nitridu (Fe_4N). Nitridy jsou vylučovány na hranicích zrn a v kluzových rovinách čímž dojde k zablokování dislokací a navýšení meze kluzu při stejné mezi pevnosti a značné omezení tvářitelnosti plechů. Proces nazýváme stárnutí oceli a je to tedy souhrn fyzikálních a mechanických vlastností, k němuž dochází v průběhu uložení plechu při pokojové teplotě nebo za teploty zvýšené. Z hlediska nauhličení je také klíčový způsob ohřevu oceli z pohledu vzniku okujů a ovlivnění chemického složení.

Tedy dle obsahu jednotlivých prvků a snížení působnosti uhlíku a dusíku v oceli bude vyrobena buď ukladněná ocel, která má podstatně delší dobu stárnutí nebo ocel neukladněná.

2.1.1. Stárnutí oceli

Ke stárnutí ocelí dochází vlivem souhrnu změn fyzikálních a mechanických vlastností. Z průběhu tahové zkoušky na obrázku 2.1.1. je vidět podstatný rozdíl mezi vystárlou respektive nevystárlou ocelí. Obr. 2.1.1. a) ukazuje oceli hned po vyválnování a obr. 2.1.1. b) je ocel vystárlá. Hodnota meze pevnosti zůstává téměř stejná, ale došlo k posunu meze kluzu vystárlé oceli k vyšším hodnotám a objevila se tzv. Lüdersova prodleva (kolísání na mezi kluzu). Prakticky jde o výrazné zúžení pásma plasticity.



Obr.2.1.1. Vliv stárnutí oceli na tvárnost

a) ocel hned po výrobě,

b) již ocel vystárlá

Hlavními činiteli stárnutí jak již je popsáno výše jsou prvky dusík a uhlík. V souvislosti s těmito prvky je nutno rozlišit dva druhy stárnutí:

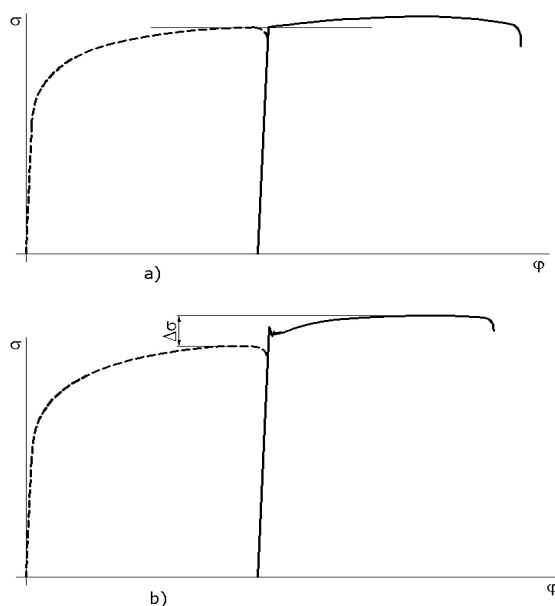
- deformační stárnutí je způsobeno obsazováním dislokací atomy dusíku a uhlíku a tím je bráněno v pohybu dislokací (dislokace na sebe přitahují atomy uhlíku a dusíku)
- stárnutí po zakalení, které je způsobeno vylučováním karbonitridů, které poté brání v pohybu dislokací.

Protože deformace je uskutečňována daným pohybem dislokací, je stárnutí bráno jako záporný vliv na chování oceli. Tento efekt je možno využít v náš prospěch u hotového výrobku, kdy výrobek můžeme nechat uměle

vystárnout. Je známo, že pro urychlení tohoto požadavku je nutno ocel tepelně ovlivnit.

Umělé stárnutí na hotovém výrobku zlepšuje mechanické vlastnosti. V automobilovém průmyslu je umělé stárnutí materiálu používáno při výrobě vnějších vypínaných dílů.

Vliv stárnutí na mechanické vlastnosti je vidět na obrázku 2.1.2.



Obr. 2.1.2. Zatěžování výlisku

a) po deformaci, b) po deformaci a stárnutí

K odstranění vlivu stárnutí pro ocele určené k tváření se může využít malá předdeformace plechu tzv. rovnací válcování. K potlačení vlivu stárnutí a tedy prodloužení doby odolnosti proti stárnutí, je třeba použít ocelí uklidněných.

2.2. Vývoj plechů pro stavbu karoserie.[15,13,12]

Nynější požadavky na zvyšování tuhosti celé karoserie vedou k používání vysokopevnostních plechů, které umožňují snižování tloušťky použitých materiálů a tím hmotnosti celé karoserie ovšem za cenu snížené tažnosti materiálu.

Výrobci plechů se tedy zabývají vyvážením závislosti tažnosti na pevnosti s ohledem na ostatní požadavky zpracovatelů plechů pokud jde např. o korozní ochranu a povrchové dodržení jakosti.

- Inovativní technologie v automobilovém průmyslu

(Výrobní technologie lisování s následným kalením výlisku)

Kalení po předešlém tváření je nově vyvinutá technika, s níž se dají vyrábět komplexní díly pro automobilový průmysl, které v sobě spojují vysokou pevnost a nízkou váhu.

Snížení spotřeby paliv, snížení emisí CO_2 a zvýšení bezpečnosti cestujících – to jsou důležité cíle výrobců pro automobilový průmysl. Existuje proto zvyšující se potřeba karosářských dílů s příznivým poměrem pevnosti a váhy. K tomuto spektru dílů patří především A a B sloupky, boční výztuhy ve dveřích a prazích, díly rámu, uchycení nárazníku, příčníky pro podvozek a střechu, podélné i příčné nosníky. Pro tento účel vyvinutý karosářský plech z martenzitické kalitelné oceli 22MnB5 nabízí dnes možnost vyrábět díly, které mají znaky hlubokotažné geometrie s pevností až 1700 MPa. Byla proto vyvinuta výrobní technologie kalení spojené s lisováním. Tato nová technologie spojuje výhodu tvarování za tepla, která dovoluje vyrábět komplexní hlubokotažné díly bez většího zpětného odpružení materiálu již známou metodou zvýšení pevnosti ocelových materiálů pomocí martenzitických spojení. Při kalení se za pomoci teploty nad A_{c3} změní stávající feritická struktura na kompletní austenitickou strukturu. Následně se při kalení pomocí prudkého snížení teploty na teplotu M_s přemění austenit na martenzit.

Vedle výše uvedené technologie se používá moderní provedení s laserově pájenými spoji a spoji lepenými strukturními lepidly se stříhovou pevností 15 a 35 MPa, a to při nižší hmotnosti vozu a větší bezpečnosti při EURO-NCAP crash testech.

- Současné trendy výrobců automobilových ocelí

Současně používané materiály pro stavbu karosérie jsou schopny dostatečně uspokojit poptávku po materiálech s vysokou mírou tvářitelnosti a zároveň s co nejvyšší mezí kluzu, resp. pevnosti. Oceli uklidněné pouze hliníkem nedokázali tento důležitý požadavek uspokojit. Proto jsou nyní výrobci válcovaných polotovarů vyvíjeny materiály nové a s co nejlepšími mechanickými vlastnostmi vhodnými pro co nejefektivnější tváření.

- Hlubokotažné materiály

Pro běžné rozdělení do několika kvalitativních skupin dle chemického složení a daných mechanických vlastnostech se používá označování na:

- **CQ** - *plechy běžné kvality (Comercial Quality)*,
- **DQ** - *tažné plechy (drawing Quality)*,
- **DDQ** - *hlubokotažné plechy (Deep Drawing Quality)*,
- **EDDQ** - *zvlášť hlubokotažné plechy (Extra Deep Drawing Quality)*,
- **EDDQ-S** - *super hlubokotažné (Extra Deep Drawing Quality – Super)*.

Tab.č.1.Charakteristické vlastnosti pro hlubokotažné ocele.

SKUPINA	$R_{p0,2}$ [MPa]	A_{80} [%]	r [-]	n [-]	$R_m/R_{p0,2}$ [-]	KUT [-]
CQ	240-260	26-30	1,0-1,2	0,14-0,16	1,2-1,3	30-40
DQ	220-240	30-36	1,2-1,4	0,16-0,18	1,3-1,4	40-50
DDQ	200-220	36-38	1,4-1,6	0,18-0,20	1,4-1,5	50-57
EDDQ	180-200	38-40	1,6-1,8	0,20-0,22	1,5-1,67	57-67
EDDQ-S	<180	> 40	>1,8	>0,22	>1,67	>67

2.2.1. IF oceli bez intersticií

Oceli bez intersticií (interstitials free steels) jsou dnes běžně používány pro stavbu automobilové karoserie. Obsah interstiticky rozpustných atomů uhlíku a dusíku je vázán ve stabilních karbonitridech (TiCN, NbCN), což je prováděné mikrolegováním Nb či Ti anebo kombinací Nb a Ti. Snížením obsahu uhlíku a dusíku ve formě tuhého roztoku docílíme výrazného zlepšení plastických vlastností oceli. Množství Nb a Ti je stále vyvíjeno pro dosažení optima mezi pevností a tvářitelností plechu. Praktické výsledky ukazují, že mnohem výhodnější je legování Nb či kombinací Nb a Ti. Ovšem množství Nb má vliv na velikost zrna, na stárnutí oceli a také zvyšuje rekrytalizační teplotu. Důsledkem je vyšší energetická náročnost při výrobě (vyšší žíhací teploty). Charakteristické mechanické vlastnosti jsou závislé na obsahu dalších legujících prvků způsobujících roztokové zpevnění (např. Mn,

P), množství a precipitátů, velikosti feritického zrna a také na hladícím válcování. Tento postup má velmi významný vliv na tvářitelnost, jelikož je prováděn za studena. Má za následek dosažené zpevnění a vznik deformační struktury.

U těchto ocelí lze využít všechny možnosti vytvrzení, které jsou popsány v následující kapitole (při dodržení podmínek pro vznik zvoleného způsobu vytvrzení). Příklad složení: 15 ppm C, 25 ppm N, 60 ppm P, 50 ppm S, 0,12% Mn, 0,03% Al, 0,05% Ti nebo 0,02% Nb + 0,01% Ti

2.3. Metody vytvrzení ocelí [4,12]

Mimo dnes používané metody vytvrzování ocelí s vyšší pevností, jako jsou zpevnění tuhého roztoku, zjemnění zrna a využívání BH efektu, se používá mechanismus strukturního zpevnění. Tohoto mechanismu je požíváno pro dvoufázové oceli, oceli TRIP, více fázové a také martenzitické oceli. Základem je vnesení jiné strukturní složky do kovové matrice (martenzit, bainit, austenit) s různou tvrdostí, tažností, příslušného obsahu. Různých strukturních složek v kovové matici je dosahováno ochlazováním z feriticko-austenitické oblasti na válcovací trati.

- **Deformační zpevnění [16]**

Podstatnou výhodou tváření za studena je výrazné zlepšování mechanických vlastností a proces zvaný tzv. deformační zpevnění. Tímto zpevněním dochází zejména ke zvýšení meze kluzu R_e , meze pevnosti R_m , ale také např. ke snížení tažnosti A_x a tedy většímu odporu tváření materiálu při následném tváření. Základním principem tohoto zpevnění je omezený skluzový pohyb dislokací při plastické deformaci a dané rychlosti příslušného přetvoření materiálu. Velikost tohoto zpevnění roste i s počtem aktivních skluzových systémů.

Křivku zpevnění lze u monokrystalu rozdělit na tři oblasti zpevnění [16]. Z hlediska tváření je nejdůležitější zpevnění v oblasti rozvinutých plastických deformací. Teorie toto popisující a vysvětlující je tzv. Model Pile-up, tedy model dislokačního lesa a teorie dislokačních skoků.

Pro polykrystalické materiály nelze použít jednotlivé teorie zpevnění samostatně, ale je nutno je sestavovat jako komplexní závislost jedné na

druhé. Na velikost deformačního zpevnění mají vliv také hranice zrn, dále jejich orientace dle směru tváření (textura), vměstky, přísadové prvky apod.

Odpor ideální mřížky kovu proti pohybu dislokací je dán Pierlsovo-Nabarroovým napětím

$$\tau = G \cdot e^{\frac{-2\pi \cdot l}{b}} \quad (1)$$

b- je velikost Burgersova vektoru a l-je délka dislokační čáry.

Způsoby zvýšení tohoto napětí jsou např:

1. Vzájemná interakce dislokací

Napětové pole v okolí shluků dislokací může zastavit činnost Frank-Readových zdrojů.

Interakce pohyblivých dislokací s dislokacemi lesa, tj. nepohyblivými skupinami dislokací, mohou způsobit zastavení pohybu dislokací.

Vznik dislokačních skoků protínáním dislokací. Dislokační skoky brzdí dislokace a mohou způsobit zastavení dislokací.

2. Interakce dislokací s přísadovými atomy

Vytvořením atmosfér atomů přísad okolo dislokací (vznik Lomer-Cottrellových bariér) vede k brždění dislokací. Napětové pole vzniklé okolo atomů přísady a jednotlivých legur materiálu zhoršuje pohyb dislokací.




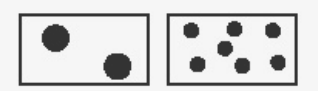
3. Interakce dislokací s atomy druhé fáze

Částice druhé fáze blokují nebo zhoršují pohyb dislokací přerušením skluzového systému.

Příslušný pohyb dislokací tedy ovlivní velikost zpevnění během plastické deformace. K popsanému zpevnění vždy dochází za působení několika faktorů zároveň.

Vedle deformačního zpevnění se na zvyšování pevnosti ocelových plechů podílí několik dalších mechanismů a jejich charakteristická kombinace pro každý typ oceli zvlášť.

Jednotlivé způsoby deformačního zpevnění se od sebe liší, vždy se však jedná o zhoršení podmínek pohybu dislokací. Velikost deformačních zpevnění je ovlivněna i mechanismy, které ovlivňují strukturu materiálu.(zpevnění tuhého roztoku, zpevnění vícefázovou strukturou.)

Mechanismus	Princip
Tuhý roztok	
Bake Hardening efekt	
Velikost zrn struktura	
Precipitací	

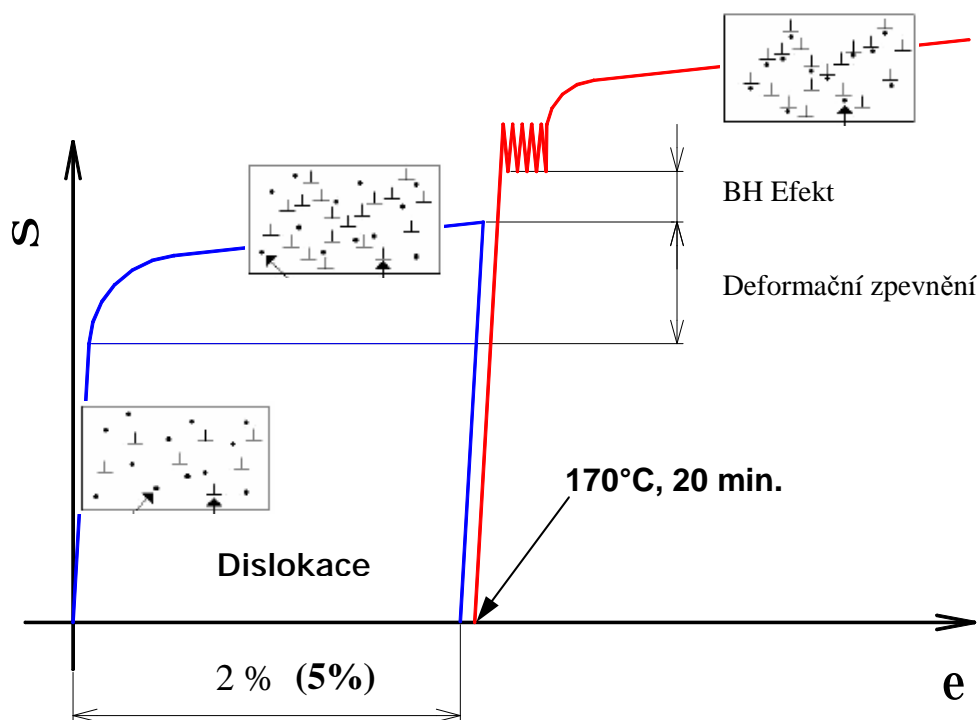
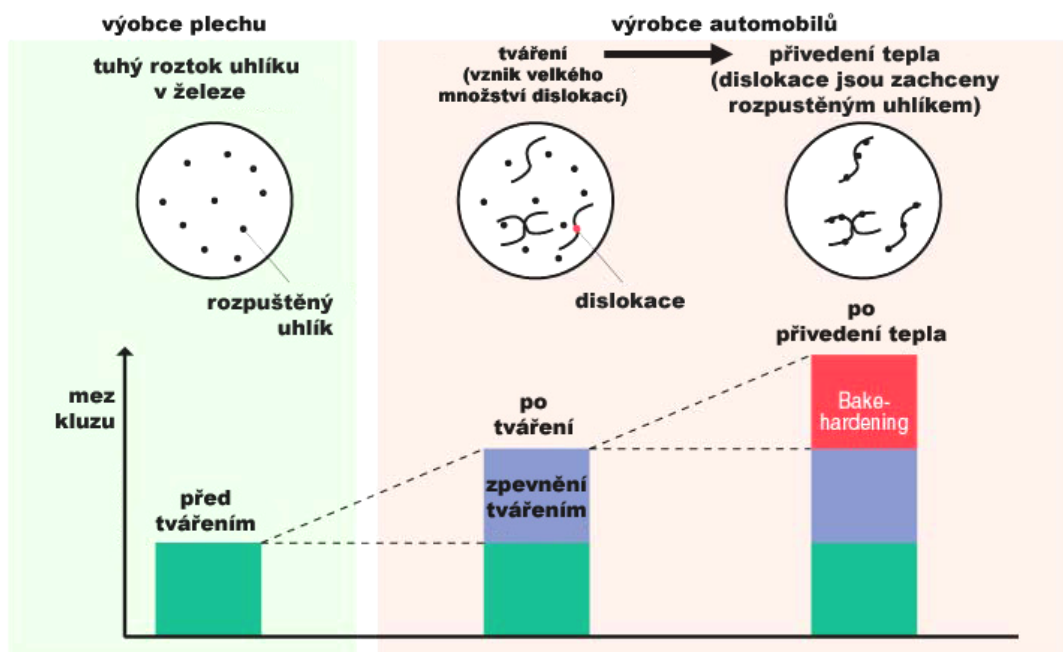
Obr.2.3.1. Schématické znázornění principů zpevnění

2.3.1. Vytvrzení ocelí vlivem BH efektu. [21,22,16]

Je známo několik mechanismů zpevnění oceli, mezi nimi např. vytvrzení tuhým roztokem, zjemnění zrna ve struktuře materiálu a vliv tzv. BAKE HARDENINGU. Speciální metoda zvýšení pevnosti tenkého plechu tzv. Bake Hardening (BHZ^{*} oceli) pro hotový a již vytažený díl při dodání dostatečného množství tepla je předmětem této diplomové práce. Názorným příkladem je například vypalování laku karoserie. Z obr. 2.3.1. je patrné, že po zmíněném BH efektu dochází k výraznému vzestupu meze kluzu a jedná se vlastně o umělé stárnutí oceli. Pro použití tohoto principu je nutná přítomnost uhlíku ve formě tuhého roztoku i po válcování za tepla.

Stejného efektu, ovšem za vyšší hlubokotažnosti jako s uhlíkem je možno dosáhnout i u ocelí s přebytkem titanu a niobu (IF oceli).

Bake Hardening proces



Obr.2.3.1. Schématicky znázorněný BH proces a vzestupná tendence na mezi kluzu

- **Plechý z IF ocelí vykazující BH efekt [21]**

Poměrně nevýhodná nízká mez kluzu IF ocelí bez intersticií (charakteristicky nevýrazná mez kluzu) pro automobilový segment eliminují IF ocele vykazující BH efekt (Bake Hardening). Jedná se tedy o jev, který zajišťuje zvýšení meze kluzu na hotových výliscích při teplotě vypalování laku automobilové karoserie, tj. při 170°C. Z chemického složení je celková velikost BH efektu závislá na obsahu uhlíku, manganu a síry. Podstatná je také historie tváření (válcování) za studena a průběh rekrytalizačního žíhání. Dle vlivu jednotlivých činitelů může jít o zvýšení meze kluzu o 35 až 70 MPa. Čímž se zlepší mechanické hodnoty pro díly automobilu jako je střecha apod. Rozlišujeme tyto dva základní typy ocelí:

- IF oceli se zvýšeným obsahem C

legující prvky jako je niob a titan jsou obsaženy tak, aby část intersticiálně rozpuštěného uhlíku ve feritové mřížce zůstala i po válcování za tepla nevázána na vzniklé karbidy legur. Jelikož v tuhém roztoku existuje určité množství nevázaného uhlíku, nelze dosáhnout vysoké hlubokotažnosti plechu. Charakteristickým znakem pro tyto ocele je dosažení BH efektu při nízké teplotě, nižší koeficient normálové anizotropie r , než u klasických konvenčních plechů z IF ocelí.

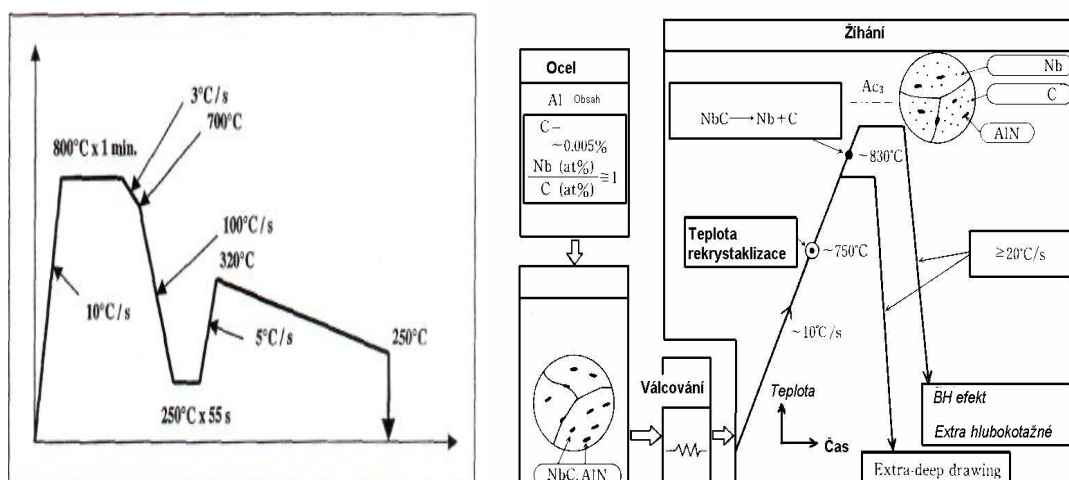
- oceli IF vykazující BH efekt se zvýšeným obsahem Ti, Nb

Vynikající hlubokotažnost těchto plechů je podmíněna co nejnižším obsahem intersticiálního uhlíku v tuhém roztoku, který se zde prakticky nevyskytuje. Potřebný uhlík se pro vytvrzovací efekt získá rozpuštěním karbonitridických precipitátů při vysokoteplotním žíhání na kontinuální žíhací lince a následným rychlým ochlazením. Vytvrzení roste s vyšší žíhací teplotou a rychlosti ochlazování.

Tedy v prvním případě je přídavek Ti a Nb do ocele nižší a to na takové úrovni, aby část uhlíku zůstala v tuhém roztoku i po válcování za tepla. BH efekt je potom možný při nižších žíhacích teplotách. Jistý obsah C v tuhém roztoku zůstává i při válcování za studena, a tím se nedaří vyrobít texturu takového typu, která zabezpečuje i vysokou hlubokotažnost. To má za

následek nízké hodnoty součinitele normálové anizotropie r , ale v porovnání s konvenčními IF oceli dostatečné mechanické hodnoty pro snížení tloušťky plechu a tím hmotnosti karoserií.

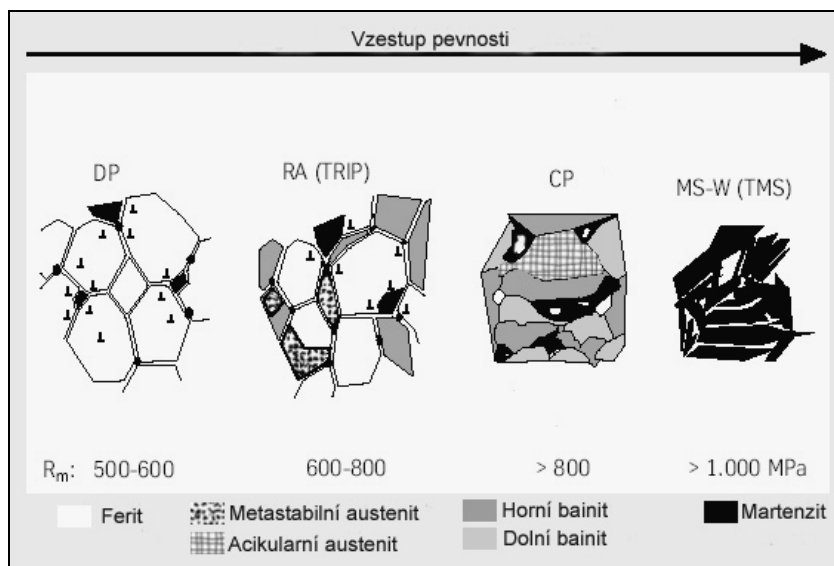
Na druhé straně BH ocele s přebytkem Ti a Nb vykazují vynikající hlubokotažnost, kde při válcování za studena uhlík v tuhém roztoku prakticky neexistuje. K BH efektu je však třeba vysokých teplot při žíhání. U tohoto typu ocelí uhlík potřebný pro BH efekt musí být zabezpečený rozpuštěním karbonitridických precipitátů při vysokoteplotním žíhání na kontinuální žíhací lince s následným prudkým ochlazením. BH efekt je potom tím výraznější, čím vyšší je teplota tohoto žíhání a následná rychlost ochlazování. Tento postup je tedy energeticky náročnější. Příklad potřebné struktury základní oceli a ohřátí na kontinuální lince je na obr 2.3.2.



Obr. 2.3.2. Teplotní cyklus na kontinuálně žíhací lince.

Tento způsob je charakteristický tím, že žíhací teplota je poměrně vysoká. Po prudkém ochlazení ze žíhací teploty na 250 °C následuje rychlý ohřev na teplotu pro BH efekt. Z metalurgického hlediska se tímto způsobem vylučuje cementit v krátkém časovém úseku. Světový výrobce ocele Nipon Steel využívající kontinuální žíhací linku, kde u oceli uklidněné hliníkem (ocel s 0,016 % C), dosahuje hodnot r = cca.1,9 a tažnost do hodnoty A =40%.

2.3.2. Dvoufázové a vícefázové oceli; vysokopevnostní oceli

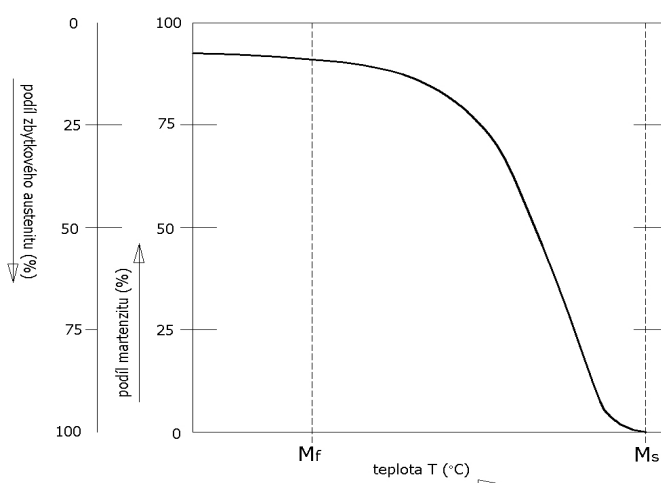


Obr.2.3.3. Struktura vícefázových ocelí

Vysokomanganové ocele typu Mn-Nb-Ti IF vykazují výrazný vzrůst aplikací těchto ocelí. Oproti mikrolegovaným a BH ocelím tyto ocele přinášejí vyšší tažnost a exponent deformačního zpevnění n . Tyto vlastnosti ovlivňují zájem zpracovatelů a na popředí výroby stojí TRIP ocele, DP ocele, CP ocele a termomechanicky zpracované nízkolegované ocele.

2.3.3. DP oceli (DP – dual phase) základní feritické matrici obsahuje 20% až 70% malých ostrůvků martenzitu, anebo pro výlisky vypínané ostrůvky bainitu. Feritem je dosažena dobrá tažnost DP ocelí. V tomto feritu, jako měkké fázi, je koncentrované napětí a dochází k jeho zpevňování. Větší množství uhlíku této oceli je zde obsaženo pro lepší kalitelnost (tvorbu martenzitu či bainitu) při nekritických ochlazovacích rychlostech a využití BH efektu. Kombinace prvků jako je Cr, Mn, V a Ni jsou přidávány pro dosažení co nejlepší kalitelnosti, tažností a pevností. U DP oceli je možné dosáhnout dobrých mechanických vlastností, kdy mez v kluzu nedosahuje ani 70% meze pevnosti (R_m až 1000 MPa). Tato skutečnost ulehčuje proces tváření, jelikož v důsledku vysokého deformačního zpevnění se snižuje riziko výrazného ztenčení materialu při tváření.

2.3.4. TRIP oceli (transformačně indukovaná plasticita) Optimalizací parametrů chemického složení a tepelným zpracováním výchozí mikrostruktury dosáhneme vhodné podíly fází této oceli se zbytkovým austenitem. Výsledná struktura oceli pro TRIP efekt je tvořena feritem, bainitem a menším množstvím zbytkovým nepřeměněným asi 20ti% podílem zbytkového austenitu. Austenit se během samotného procesu tváření transformuje na tvrdý martenzit nebo se stabilizuje (odtud název oceli). Výroba tohoto typu ocelí vyžaduje velmi precizní kontrolu deformačně-tepelného cyklu na válcovací trati. TRIP oceli obsahují větší množství uhlíku, křemíku a hliníku než DP oceli. Tím docílujeme snížení teploty martenzitu finish- M_f (obr. 2.3.1.) pod teplotu okolí a zajištění tak vytvoření zbytkového austenitu. Množství uhlíku má také vliv na přetvoření austenitu na martenzit. Při nižším obsahu uhlíku je austenit přetvořen již během tváření, což má za následek vysoké zpevňování oceli již během procesu lisování. Naopak při vyšším obsahu uhlíku zůstane austenit stabilní i po vylisování a začne se přeměňovat až při vnesení další deformace (napětí), jakou je např. náraz. Zvyšuje se tím schopnost pohltit deformační energii např. náraz. Zvyšuje se tím schopnost pohltit deformační energii. Dosahované mechanické vlastnosti TRIP ocelí jsou 700 MPa a více jak 28% tažnosti.



Obr.2.3.4. Martenzitická křivka; M_f a M_s teplota konce a začátku tvorby martenzitu

2.3.5. CP oceli (complex phase). Tyto vícefázové oceli s jemnozrnnou strukturou, která je tvořena feritem, bainitem, martenzitem a také austenitem jsou dalšími zástupci strukturního zpevňování. Kromě tohoto strukturního

zpevnění je zde osbaženo také zpevnění jemnými precipitáty a BH efektem. CP ocel je navíc mikrolegována Nb, Ti a/nebo V pro tvorbu jemného precipitátu a chemické a technologické pochody pro výrobu jsou obdobné jako u DP a TRIP ocelí. Charakteristickým znakem CP oceli je vysoký stupeň deformačního zpevnění vázaný na předem dané jemnozrnné struktury. To zaručuje u CP oceli a velmi dobrou rozměrovou stálost výlisků. Mez pevnosti je u CP oceli vyšší než 800 MPa a dále mají tyto oceli velmi dobrou schopnost absorbovat deformační energii při nárazu tzv. dynamické zpevnění

2.3.6. Martenzitické oceli. Výsledná struktura této oceli-martenzit je dána tím, že všechen austenit je transformován na tvrdou fázi během ochlazování na válcovací trati nebo ochlazováním ze žhacích teplot. **Martenzitické** oceli řadíme mezi materiály s nejvyšší dosahovanou mezí pevnosti, která může být dle teplotně-chemických podmínek větší jak 1300 MPa. Jelikož výsledná struktura sama osobě nedává dobré vlastnosti k tváření pro zlepšení tažnosti je popouštěna a může mít tak dostatečně vysokou tvářitelnost při maximálních hodnotách pevnosti. Je možné je profilovat (ohýbat) nebo i lisovat. Přísadové prvky jako jsou Mn, Si, Cr, Mo, B, V a Ni jsou vhodně kombinovány a pro zvětšení kalitelnosti je v oceli ponechán uhlík.

Tab.č.2.Charakter ocelí pro karoserie automobilů

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]	n [-]
Ocele uklidněné	140 - 280	270 - 410	20 – 40	0,2
AI				
IF oceli	120 - 140	250 - 290	20 – 45	0,23
IF oceli s BH	200 - 300	350 - 450	min.36	0,19
TRIP ocele	400 - 700	600 - 1000	22 – 26	0.18
DP ocele	270 - 460	500 - 600	18 – 25	0,14
CP ocele	680 - 700	800 - 1050	min.10	* 0,12
MS ocele		1000 - 1500	min. 8	*

* A_{50}

2.4. Hodnocení pevnostních materiálů [1,9,17]

Technologické hodnocení materiálů je u plošného tváření velmi podstatnou součástí lisovacího procesu ve vazbě navrhovaný nástroj-charakteristika plechu. Pro vyhodnocení materiálů s vysokými pevnostními vlastnostmi se používají stejné zkoušky jako pro ostatní běžné materiály. K hodnocení plechů se nejčastěji používá statická zkouška tahem a dále napodobující technologické zkoušky tvářitelnosti. Při technologických zkouškách plechů většinou dosahujeme mezního stavu tj. až vzniku trhliny na zkoušeném materiálu při daných deformačních, rychlostních a teplotních podmínkách. Pro různé stavy napjatosti a jednotlivé technologické zkoušky se používají zcela odlišná zařízení a vzorky.

2.4.1. Statická zkouška tahem

Statická zkouška tahem je dána ČSN - EN 10002-1 [17] a je nejrozšířenější zkouškou pro získání potřebných hodnot mechanických vlastností materiálů. Tato norma stanovuje příslušné podmínky i způsob vyhodnocení zkoušky, které je třeba vždy dodržet. Z této zkoušky získáme hodnoty, které slouží k hodnocení tvařitelnosti materiálu.

Těmito běžnými veličinami jsou:

- > mez pevnosti R_m ,
- > mez kluzu $R_{p0,2}$,
- > tažnost A_g ,
- > kontrakce Z .

Poté je nutno potřebné vlastnosti materiálu posoudit jako poměr meze kluzu a meze pevnosti i s ohledem na tvar křivky, která je získána při tahové zkoušce.

Ukazatelé informativního charakteru jsou:

Ukazatel hlubokotažnosti:

$$UH = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \quad (2)$$

Ukazatel zásoby plasticity materiálu:

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot A_x \quad (3)$$

Komplexní ukazatel tvářitelnosti

$$KUT = A_x \cdot \frac{R_{p0,2}}{R_m} \quad (4)$$

- exponent deformačního zpevnění - n

Pro vyhodnocení tvařitelnosti má mnohem větší význam tento zmíněný exponent deformačního zpevnění n – popisující intenzitu zpevňování při jednoosé deformaci. Je definován jako exponent v rovnici (9) vyjadřující závislost skutečného napětí na skutečném přetvoření.

$$s = C \cdot j^n \quad , \text{resp.} \quad s = C \cdot (j_s + j)^n, \quad (5)$$

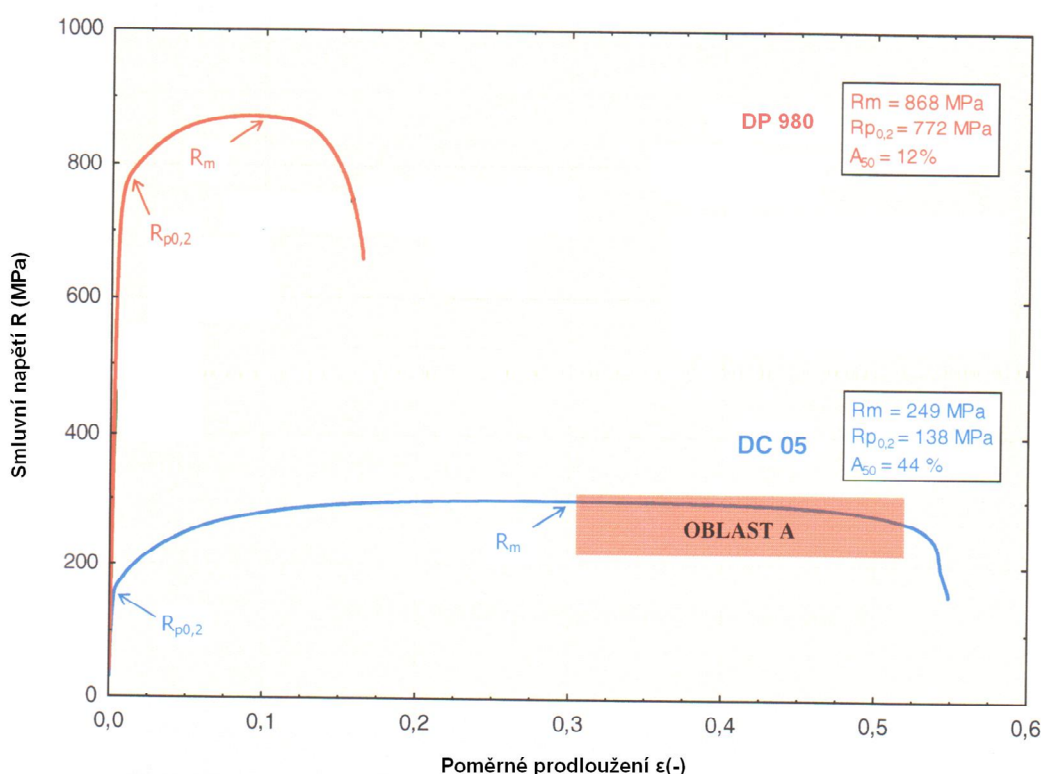
V rovnici (5) je C modul monotónního zpevnění a φ_0 je velikost posunutí křivky zpevnění po ose x tak, aby bylo dosaženo meze kluzu při $\varphi = 0$.

Konstanty C a n jsou datové hodnoty potřebné pro numerické simulace plošného tváření.

Získat koeficient deformačního zpevnění lze dle zvoleného způsobu několika způsoby [23]. Nejjednodušší způsob určení exponentu n je dnes prováděn pomocí vhodných software, které podle zadaného intervalu přímo vygenerují aproximační rovnici (5). Hodnota n je závislá na velikosti zrna (hladicím válcování), na stárnutí oceli, rychlost deformace. Celkově lze říci, že má význam u takového tváření, kde převládají tahová napětí a jeho změna má velký vliv na tvářitelnost plechu.

Příslušné intervaly hodnot se podle doporučení různých norem liší:

Podle ČSN ISO 10275 je to interval v rozsahu hodnot rovnoměrné plastické deformace od $\varphi = 5\%$ až do maximální hodnoty rovnoměrného přetvoření. K popisu křivek zpevnění je uveden obrázek 2.4.1.



Obr. 2.4.1. Smluvní diagram statické zkoušky tahem hlubokotažné ocele a pevnostního plehu

Z porovnání obou křivek je zřejmé, že u hlubokotažného materiálu můžeme při lisování překročit mez pevnosti materiálu, aniž dojde ihned k jeho destrukci. Jinými slovy máme k dispozici ještě určitou zásobu plasticity (oblast „A“), čehož se také v praxi často využívá. U pevnostního materiálu je charakter naprosto odlišný. Pokud se při lisování dosáhne meze pevnosti, dojde téměř hned k porušení struktury a materiálu. Tento rozdíl je dán rozdílným charakterem lomu viz Kap.2.6.

2.5. Diagram mezních přetvoření (DMP) [10,16,20]

2.5.1. Obecná charakteristika diagramů mezních přetvoření

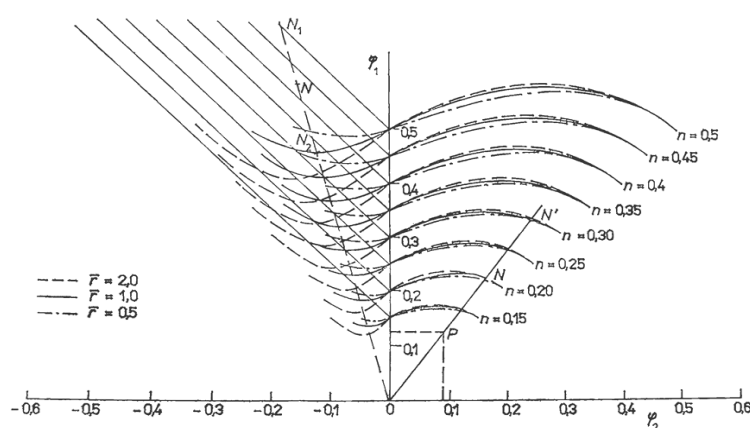
Diagramy mezních přetvoření slouží k podávání kvalitativních informací o lisovatelnosti materiálu s respektováním různých stavů napjatosti. Vlastnosti ocelových plechů jsou pak pomocí těchto DMP posuzovány s ohledy na mezní hranice tváritelnosti.

Při lisování ztráta stability na mezi pevnosti libovolného elementu vede k náhlému vyčerpání plastických schopností materiálu a vzniku lomu. Ve smyslu plastické deformace mezní schopnosti materiálu ovlivňuje také stav napjatosti plechu během procesu tažení. Označený stav napjatosti lze pro rovinnou napjatost určenou hlavními normálovými napětími v rovině plechu s_1 a s_2 , ($s_3 = 0$) viz obr. 2.5.2. definovat ukazatelem stavu rovinné napjatosti.

Ukazatel stavu rovinné napjatosti nabývá při tažení výlsků nepravidelných tvarů mezních hodnot $m_s \in \langle -1, 1 \rangle$. Pro definované teplotně-rychlostní podmínky je možné vyjádřit mezní přetvoření v závislosti na stavu napjatosti. Mluvíme-li o dvouosém stavu napjatosti, je vhodné vyjadřovat velikost přetvoření, resp. velikost kritických přetvoření pomocí intenzity přetvoření (kritické)

$$j_{ik} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{(j_1 - j_2) \cdot (j_2 - j_3) \cdot (j_3 - j_1)} \quad (6)$$

Diagramy mezních přetvoření je pak možno vyjadřovat v souřadnicích $m_s - j_{ik}$. Křivky mezních přetvoření podle Tomlenova odpovídají případům ztráty stability na mezi pevnosti. Rychlejší metoda získání DMP předpokládá přímo využití kritických, normálních přetvoření j_{1k} , j_{2k} , při daných stupních napjatosti. (viz kap 2.5.2.)



Obr 2.5.1. Teoretické křivky mezních deformací pro materiály s odlišnými konstantami r a n .

- **Experimentální metody získávání diagramů mezních přetvoření.**

Získávání hodnot diagramů mezních přetvoření za podmínek blízkých reálnému lisování při různých stavech napjatosti nás vede k přímému hodnocení plastičnosti ve vztahu k technologii tažení. K sestrojení DMP je nutno naměřit soubor dat tj. dvojic mezních přetvoření φ_1 , φ_2 , při různých typech napjatosti.

Pro experimentální získávání DMP je používáno např. zkoušky tahem tyčí opatřenými vruby různých tvarů nebo zkouška vypínání tvarových nástřihů s vystřiženými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem či zkouška hydrostatická s eliptickou tažnicí.

2.5.2. Podstata DMP [10,16]

V souvislosti s výše popsaným charakterem DMP lze popsat ztrátu stability procesu tváření s vyčerpáním schopnosti libovolného elementu plechu přenášet tvářecí sílu tj. vyčerpání plasticity a vznik lomu. Mezní stavy přetvoření daného materiálu je možno vyjadřovat za daných teplotně-rychlostních podmínek v závislosti na napjatosti. Stav napjatosti, k určení diagramu mezních přetvoření, je tedy vyjádřen z hodnot zjištěných hlavních normálních přetvoření φ_1 , φ_2 , při daných stupních napjatosti.

Směrodatným ukazatelem stavu rovinné napjatosti je pak:

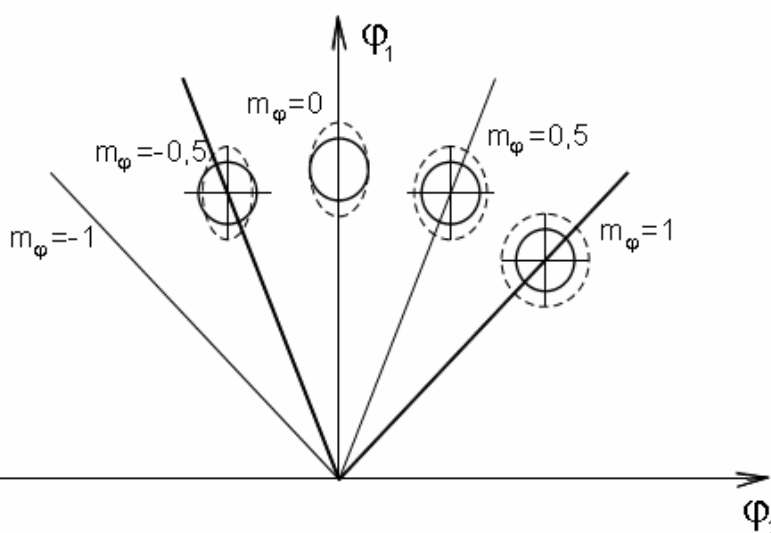
$$m_s = \frac{S_2}{S_1}, \quad (7)$$

Diagram mezních přetvoření (DMP) využívá závislost největšího přetvoření φ_{1k} na nejmenším přetvoření φ_{2k} v rovině plechu. Tento postup zavedli Keller a následně Goodwin vycházejíce z izotropního materiálu, stálosti objemové hmoty a deformace.

Z výlisku nelze obecně určit přímo velikost napětí, ale lze bezprostředně pomocí deformační sítě nanesené na povrchu plechu odečíst a změřit hodnoty přetvoření jako následek působící dvouosé napjatosti. Pro vhodný ukazatel přetvoření je zde definován ukazatel stavu přetvoření m_φ :

$$m_j = \frac{j_2}{j_1} \quad (8)$$

Je dáno, že ukazatel stavu přetvoření m_φ leží ve stejném intervalu jako ukazatel m_σ čili $m_\varphi \in \langle -1, 1 \rangle$. A tudíž jako u m_σ paprsky vycházejí z počátku souřadného systému a určují $m_\varphi = \text{konst.}$ Vzhledem k těmto skutečnostem je v praxi ve vztahu ke komplexní analýze přetvoření používáno výhradně DMP v souřadnicích $\varphi_2 - \varphi_1$ tj, ukazatel m_φ namísto m_σ . Praktické zkušenosti nabyté experimentálními způsoby určování KMP ukázaly, že ke vzniku trhlin na výliscích dochází při stavech a hodnotách přetvoření ohraničených rozsahem $m_\varphi = -0,5$ a $m_\varphi = 1$. A právě v tomto pásmu je pak nutné při sestavování diagramů v laboratorních zkouškách diagramů mezních přetvoření modelovat.



Obr. 2.5.2. Stavy přetvoření v DMP charakterizované ukazatelem m_φ

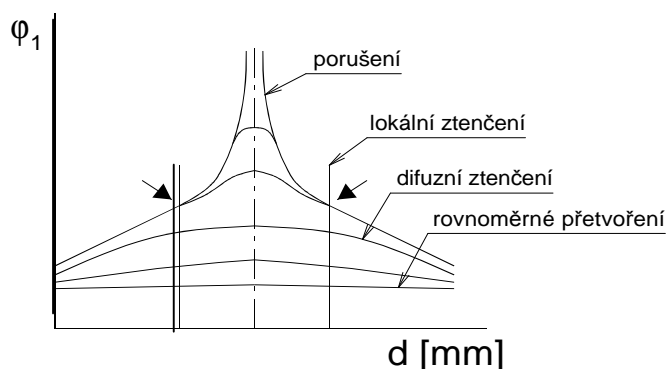
Z hlediska hodnoty mezních deformací daných nejen plasticitou plechu, ale je i nutno tuto hodnotu popsat způsobem **definování mezního stavu**. Za mezní stav lze považovat dosažení meze pevnosti materiálu, anebo z druhého pohledu jde o porušení plechu tvárným lomem. Pro získání uceleného popisu diagramu DMP je proto nutné získat řadu hodnot mezních přetvoření v rozsahu příslušných stavů m_φ pro zvolený mezní stav v daném intervalu. Modelovat různé stavy m_φ lze experimentálně či početně, je-li vytvořen matematický model chování příslušného materiálu. Z DMP lze vyhodnotit plastické vlastnosti dvou porovnávaných materiálů, či využít tento

diagram ke komplexnější analýze přetvoření výlisku. Při experimentálním stanovení DMP je nutné velikost mezního stupně deformace stanovit prostřednictvím měření deformační sítě. Jednoznačné definování mezního stavu přetvoření a způsobů jeho určování musí být velmi přesné, neboť to jsou důležité faktory, které zásadně ovlivňující polohu a tvar křivek mezních přetvoření a celkové dimenzování materiálu.

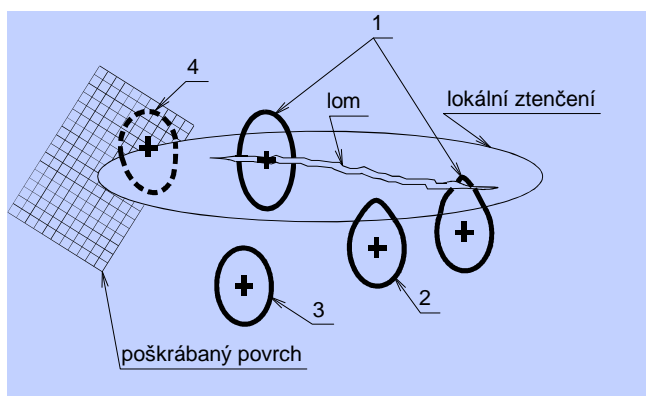
Podstata dané úlohy spočívá ve stanovení, pro jakou hodnotu mezní stav nadefinujeme a jakým způsobem se bude tato hodnota dosaženého přetvoření, jež bude považováno za mezní, zjišťovat. Bylo konstatováno, že v oblasti velkých plastických přetvoření lze mezní stav definovat v rozmezí meze pevnosti a okamžiku vzniku tvárného lomu. Oba takto zvolené mezní stavy představují krajní hranice. Je zřejmé, že mezi těmito krajními mezemi může existovat celá řada různě definovaných mezních stavů. Volbu mezního stavu je vhodné, s ohledem na komplexní využití diagramů, uvažovat ve vztahu k reálnému výlisku. Určit dosažení meze pevnosti u výlisku je dost obtížné, ne-li nemožné, zatímco objevení se první trhliny je naprosto evidentní. První případ může znamenat nevyužití plastičnosti materiálu, druhý pak znamená již neopravitelný zmetek. Přestože vysokého lomového přetvoření nelze z praktického hlediska ve vztahu k výlisku již využít, bylo by možné k analýze přetvoření použít i křivku mezních přetvoření (KMP) stanovenou pro okamžik vzniku lomu. Pro reálné výlisky je však prakticky využitelné jen přetvoření realizované do okamžiku vzniku lokálního ztenčení. Potom se deformace lokalizuje do úzkého krčku, kdy za stavu rovinného přetvoření dochází k prodloužení pouze na úkor tloušťky plechu. V okolí krčku k deformaci prakticky nedochází. Vzhledem k malé tloušťce plechu je pak přírůstek přetvoření v tomto okamžiku pro realizaci změny tvaru výlisku zanedbatelný.

Charakter rozložení přetvoření v okolí trhliny v různých fázích tažení je zřejmý z obr. 2.5.3. Objektivní vizuální určení definovaného mezního stavu je dosti obtížné. Proto byly na základě experimentálních pozorování navrženy různé metody jeho stanovení, např. metoda ekvivalentního bodu, metoda grafická, metoda interpolační, apod. Obecně nejrozšířenější postup při určování mezního přetvoření dle výše uvedené definice vychází z výběru

vhodných elementů z okolí lomu, jak je naznačeno na obrázku 2.5.4. Zviditelnění lokálního ztenčení okolo trhliny se dosáhne mírným poškrábáním povrchu plochým brouskem. Výběr pak zahrnuje elementy deformační sítě zasažené lomem (č.1 na obr. 2.5.4.), lokálním ztenčením (č.2) a takové, které sousedí s místem porušení, ale nejsou zasaženy ani lomem, ani lokálním ztenčením (č. 3). Poloha bodů v DMP představujících přetvoření dle jednotlivých vybraných elementů je zřejmá - v DMP budou nejvýše body č.1 pak č.2 a nejnižší č.3. Křivka mezních přetvoření ve smyslu navržené definice pro počátek lokálního ztenčení je vedena tak, aby ležela nad body určené elementy č.3 a pod body danými elementy č.1 a č.2. Takto určená KMP v podstatě odděluje v DMP dvě oblasti. Nad ní existuje lokální ztenčení, pod ní ještě nedošlo k lokalizaci deformace. KMP tvořící rozhraní obou těchto oblastí tak může odpovídat počátku vzniku lokálního přetvoření a plně vyhovět dané definici mezního stavu.



Obr. 2.5.3. Charakter rozložení přetvoření j_1 v okolí trhliny



Obr. 2.5.4. Výběr elementů deformační sítě pro určení mezního přetvoření

Všechny výše zmíněné postupy určení mezního stavu si kladou za cíl co nejpřesnější a nejjednodušší určení mezního přetvoření v souladu s přijatou definicí. V této souvislosti je třeba si dále uvědomit, že rozložení přetvoření (zvláště j_1) vykazují různě velký gradient, daný zejména tvarem zkušebního tělesa, podmínkami tření, křivostí tažníku. Uvedené skutečnosti komplikují a znesnadňují efektivní určení mezního přetvoření. S ohledem na využívání experimentální metody určení DMP v rozsáhlém měřítku, důležitém pro potřeby praxe, je vhodné modifikovat předchozí způsoby tak, aby přijatá metoda určování mezního přetvoření byla rychlá, snadná, pokud možno jednoznačná a v souladu s jeho definicí. Vzhledem k tomu, že vznik lomu je na výlisku evidentní, je výhodné odvíjet stanovení mezního stavu právě od vzniku lomu. Pak ve smyslu přijaté definice mezního stavu vhodně vybrat v okolí trhliny jednotlivé elementy deformační sítě, které budou použity ke stanovení mezního přetvoření. Pro přesné určení mezního stavu je navíc nutno měřit elementy v místě prvního vzniku lomu. Za mezní přetvoření je dle výše přijaté definice považováno to, které z vnějšku bezprostředně sousedí s lokální zónou. Tomu odpovídá střed elementu č.4. na obrázku 2.5.4. (50% elementu zasaženo lokálním ztenčením) a jeho hodnota je na obr. 2 označena šipkami. Výběr právě takového elementu je však, s ohledem na proměnnou šířku lokálního ztenčení v závislosti na tloušťce plechu a m_ϕ při daném parametru sítě, značně problematický.

Z dosud provedených experimentů vyplývá, že přijaté definici mezního stavu se nejvíc blíží hodnoty, které jsou získány měřením elementů č.2 na obr. 2.5.4.

Podstatná část plochy vymezená vybranými elementy je zasažena rovnoměrným přetvořením a je zřejmé částečné zasažení lokálním ztenčením, které zvyšuje naměřené přetvoření j_1 a kompenzuje snížení hodnoty přetvoření v důsledku gradientu přetvoření j_1 . Při dané velikosti elementu nanesené sítě je změřená hodnota deformace přiřazena středu elementu. Střed měřené elipsy č.2 na obr. 2.5.4. však není stejný s úrovní „lokální ztenčení-rovnoměrná oblast“, kde lze očekávat dle přijaté definice

mezní přetvoření, a je posunut do rovnoměrné oblasti. To se podílí na nižších hodnotách přetvoření. Zvolená metoda je výhodná v tom, že při nižším počtu měření, kdy se omezujeme na měření elementů č.2. se obecně sníží náročnost celého experimentu. Výhodou pak je, že umožňuje následné statistické odečtení výsledků, které podávají co nejširší množství informací využitelné z proběhlého experimentu na zkoušeném tělese.

Pro zjištění DMP experimentální metodou je použito metodiky vypínání tvarových zkušebních těles s proměnnou šířkou tělesa „b“. Tato metoda určování KMP je úspěšně používána na katedře KTP-TU v Liberci a metodika provedení a vyhodnocení celé zkoušky je již plně propracována a začleněna do práce této katedry.

- **Ztráta stability na mezi kluzu [16,20]**

Ztráta stability v oblasti malých plastických deformací se projeví vznikem tzv. Ludersových povrchových vrásek. S rostoucím přetvořením do oblasti rozvinutých deformací dochází k jejich vymizení. Povrchové vrásky se vyskytují především u mělkých výtažků při působení malých přetvoření. Je zřejmé, že materiály mající nevýraznou mez kluzu nejsou na vznik Ludersových vrásek náchylné.

Tyto povrchové vrásky jsou značným problémem z hlediska estetických požadavků u tzv. pohledových dílů.

Pokud známe směry hlavních působících přetvoření φ_1 , φ_2 , pak úhel α , který budou svírat Ludersovy vrásky a směr hlavního přetvoření φ_1 vyjádříme rovnicí

$$\operatorname{tg} \alpha = \pm \sqrt{\frac{m_s - 2}{2 \cdot m_s - 1}} \quad (9)$$

Kde m_6 viz kap. 2.8.1. Je známo a experimentálně ověřeno [20], že Ludersovy vrásky se objevují pouze ve stavech napjatosti m_6 . Zde je z rovnice (9) výsledné řešení:

$$\frac{m_s - 2}{2 \cdot m_s - 1} f_0 \quad (10)$$

Dle této rovnice se Ludersovy vrásky nebudou vyskytovat v rozmezí $l/2 \leq m_6 \leq 1$.

Z výše popsaného je zřejmé, že vznik povrchových vrásek je tedy ovlivněn volbou materiálu a technologickými podmínkami upravujícími stav napjatosti. Jde o silové podmínky především v oblasti přidržovače i použití brzdných lišt. Sílu přidržovače je nutno volit s důrazem na technologii tváření, tažnost (plasticitu) materiálu a velikost výlisku. Zvlnění v oblasti volného povrchu výlisku vzniká především v oblasti mezi tažnou hranou tažnice a dotykovým místem mezi tažníkem a plechem v počáteční fázi tažení. Definované zvlnění nelze odstranit jednoduchým způsobem pomocí nástroje, neboť v tomto místě materiál není s nástrojem přímo v kontaktu.

Jsme-li nuceni vytvořit větší plastické přetvoření, než které je přípustné z hlediska ztráty stability vybočením, je možno z hlediska tvaru výlisku a s přihlédnutím k daným technologickým podmínkám zabránit vzniku vln:

- a) vytvořením místního prolisu nebo změnou tvaru,
- b) změnou stavu napjatosti (intenzivnějším bržděním plechu).

Změnu tvaru nebo vytvoření prolisu je možné realizovat pouze pokud to dovoluje tvarová koncepce výlisku. Naopak z hlediska změny stavu napjatosti nejsme omezeni tvarem, ale nesmíme překročit dovolené hodnoty maximálních přípustných přetvoření materiálu. Z uvedeného je zřejmé, že odstraňování zvlnění v uvažovaných oblastech je velmi problematické a náročné.

- **Ztráta stability na mezi pevnosti [16]**

Popisuje ztrátu stability v oblasti velkých plastických přetvoření, při kterém ke ztrátě stability na mezi pevnosti dochází po překročení maximálních plastických schopností materiálu při daném stavu napjatosti. Při definovaných podmínkách a jednoosém stavu lze tuto ztrátu stability pozorovat u zkoušky tahem.

Pro mezní případy tváření má tato ztráta stability největší význam, protože vede k nebezpečí porušení výlisku (zmetkovitosti) zejména u pevnostních materiálů. Při dosažení meze pevností se stávající rovnoměrné přetvoření změnit v lokalizované a začíná se vlivem tohoto napětí tvořit krček a může tedy dojít nežádanému porušení materiálu.

Pokud budeme uvažovat o dvouosé napjatosti (tažení plechu) je meze pevnosti i charakteru přetvoření a porušení mnohem složitější. Zde je nutno vycházet z obecné podmínky stability.

Předpokládáme-li jen prosté zatěžování izotropního materiálu a splnění podmínky, $|s_1| \geq |s_2|$, lze podmínku stability upravit na tvar:

$$\left(\frac{ds_i}{dj_i} \right)_k = f_1(m_s) \cdot s_{ik} \quad \text{kde pro} \quad (11)$$

$$f_1(m_s) = \frac{2 - m_s}{2 \cdot \sqrt{1 - m_s - m_s^2}}$$

Dosažením (5) do (11) dostaneme vztah pro výpočet maximálních (mezních) hodnot plastického přetvoření

$$j_{ik} = \frac{2 \cdot \sqrt{1 - m_s - m_s^2}}{2 - m_s} \cdot n \quad (12)$$

Tento zde uvedený vztah platí v případě, že uvažované síly F_1, F_2 působí na stejný teoreticky zvolený element. V oblasti přidržovače tato podmínka splněna není a podmínku (11,12) je nutno upravit tak, že šířka uvažovaného elementu je konstantní, tzn. $d\varphi_2 = 0$. Stejným využitím postupu jako u rovnice (18) dostaneme pro určení maximálních přetvoření vztah

$$j_{ik} = \frac{2 \cdot \sqrt{1 - m_s - m_s^2}}{1 + m_s} \cdot n \quad (13)$$

Zde uvedené vztahy (12,13) ovšem neuvažují daný vliv anizotropie materiálu, která mezní přetvoření výrazným způsobem ovlivňuje.

- Tedy výše odvozené vztahy nám nedávají celkový pohled na teorii tváření, protože neberou v úvahu takové důležité podmínky lisování jako je rychlost přetvoření, tření, tloušťka plechu, nejednotnost materiálových charakteristik atd. To vede k závěru, že je nutností využívat metod příbuzných s podmínkami blízkými praktickému lisování, tedy metod experimentálních.

2.6. Základní teorie tvárného lomu [12,18]

U materiálů lze tvárný lom považovat za zdroj růstu mikroporuch v procesu plastické deformace, jejich nukleací vznikají další volné povrchy v objemu celého elementu. Obecně lze říci, že růst mikroporuch je dán vyúsťováním skluzových dislokací k defektu. Výpočty mezních přetvoření daných vznikem tvárného lomu popsal ve své publikaci A.K.Ghosh. Jeho kritériem je tedy ztráta termodynamické stability soustavy (kritické hodnoty soustavy a jejich mezních parametrů. Ke spojování mikroductin dochází vytvářením lokalizovaných smykových pásů napříč tloušťkou plechu.

2.6.1 Křehký lom

Při deformaci materiálu křehkým lomem za působení vnějších sil dochází k porušení mechanicky namáhaného místa bez předchozí makroskopicky rozeznatelné deformaci plastické. Lom vzniklý stěpením meziatomových vazeb může probíhat po hranicích zrn nebo napříč, tedy transkrystalicky.

2.7. Vliv rychlosti deformace v procesu tváření [1,10,11,16]

Vysoká úroveň techniky a snaha o dosahování maximálních výrobních produktivit vede k dokonalejšímu poznávání procesů, které probíhají v materiálu za podmínek jako např. rychlost zatěžování. Vliv rychlosti zatěžování v , resp. vliv rychlosti deformace na chování konstrukčních materiálů a zvyšování rychlosti tvářecích strojů je reakcí na stále rostoucí ekonomický tlak. Snaha zrychlit výrobní postupy nutí výrobce nasazovat stroje schopné regulovat svoji rychlost a parametry podle okamžitých požadavků dle aktuálního vyráběného dílu. Příkladem toho je např. hydraulický lis se sinusoidním pohonem a možností kování s řízenou

proměnlivou rychlostí deformace. Rychlost běžných konvenčních strojů používaných při lisování výlisků z plechu se pohybuje v rozmezí <300-600> mm/s.

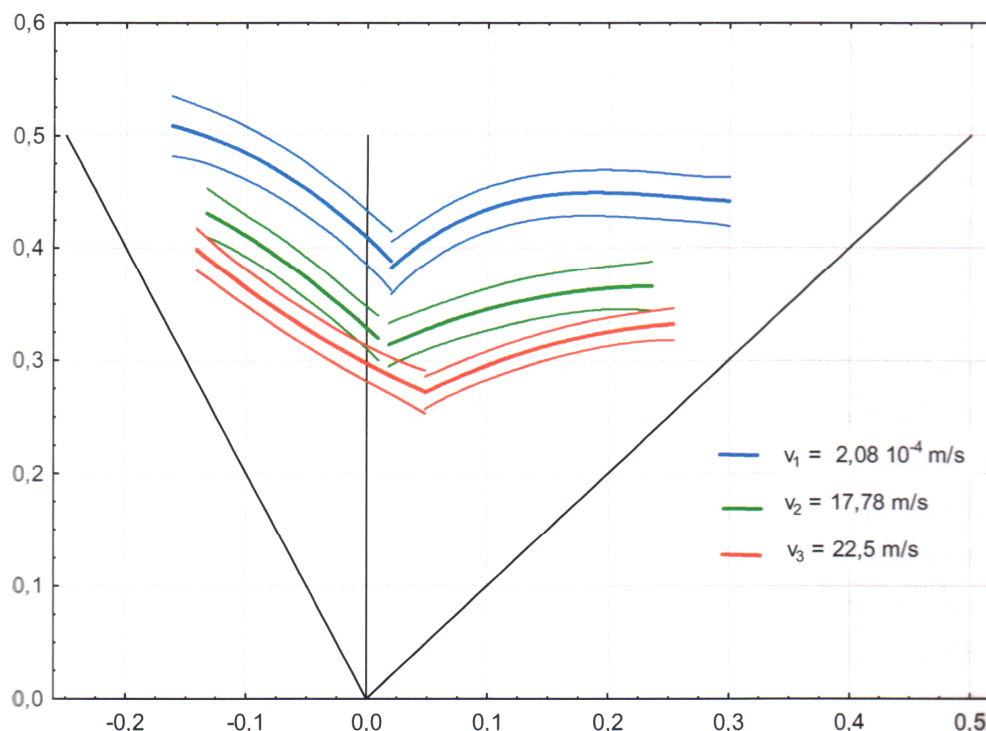
- Definice rychlosti deformace

Při procesu tváření tělesa dochází k relativnímu pohybu mezi jednotlivými částicemi tvářeného materiálu. Rychlost relativního pohybu částic materiálu se označuje jako rychlost deformace, resp. deformační rychlost $\dot{\epsilon}$, resp. $\dot{\epsilon}$

Deformační rychlost není totožná s rychlostí nástroje. Velikost rychlosti tažení na začátku tažení klesá na nulovou hodnotu v dolní úvratí beranu. Rychlost deformace při nekonečně malé lineární deformaci ve směru 1 se vypočítá jako

$$\dot{\epsilon} = \frac{dj}{dt} \quad [s^{-1}] \quad (14)$$

Míru ovlivnění diagramu mezních přetvoření touto změnou technologických podmínek lze usuzovat např. prostřednictvím změn polohy a tvaru křivek mezních přetvoření. Z rozsáhlého výzkumu změn poloh KMP, které jsou prováděny na katedře KSP-TU Liberec, je možno si udělat celkový pohled na chování těchto materiálů právě při podmínkách zvýšené rychlosti tažení. Podrobnější analýza těchto změn není tématem této diplomové práce. Charakteristiky DMP pro různé velikosti dopadových rychlostí jsou uvedeny v obr. 2.7.1



Obr. 2.7.1. Znázornění vlivu dopadové rychlosti na velikost deformace

Z tohoto diagramu je zřejmá podobnost diagramů ve všech třech případech, ale odlišnost při rostoucí rychlosti, kdy se DMP posouvá k nižším hodnotám ve směru osy φ_1 . Výrazně se také celkově posouvá i k nižším hodnotám.

2.8. Vztah crash-testů a pevnostních plechů a jejich vliv na tuhost karoserie. [15,19,22]

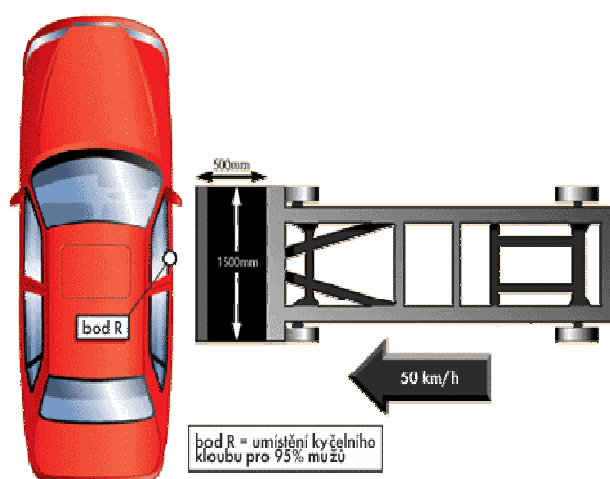
Testované plechy použité v experimentální části by měli být součástí vyztužení prahů karoserie a proto z hlediska bezpečnosti rozhodují jejich pevnostní hodnoty o ochraně posádky a tuhosti samonosné karoserie jako celku. Ve zmíněných crash-testech jde tedy o boční deformační zónu, která pohltí energii nárazu. Protože by se nepřipustně zvýšila šířka vozu nelze vytvořit stejně hodnotnou boční deformační zónu, jakou má třeba jen zadní část vozu. Proto jsou všechna vozidla z boku velmi zranitelná, malé vozy vlastně žádnou boční deformační ochrannou zónu nemají. Deformační zóna je velmi malá, je spíše snaha o **vyztužení boku** proti nadměrné deformaci za účelem zachování prostoru pro přežití posádky. Z tohoto důvodu se zesiluje

konstrukce dveří a prahů. Více tam udělat nelze zejména z hlediska šíře vozu.

Bezpečnost každého automobilu je dána mnoha parametry a vozy musí splňovat řadu národních i mezinárodních předpisů, které mají zajistit co největší bezpečnost posádky vozidla při jeho případné havárii. Zde jde o dostatečnou pevnost kabiny pro posádku a vhodné deformační zóny.

Pasivní bezpečnost se ověřuje nárazovými zkouškami, předepsanými mezinárodně uznávanými stanovenými předpisy provedení zkoušky. V devadesátých letech dvacátého století vznikla nezávislá iniciativa Euro NCAP, která stanovila vlastní metodiku měření nárazovými zkouškami. Tyto testy jsou obvykle přísnější než běžné předpisy, například pro čelní náraz používá Euro NCAP vyšší rychlost a zavedl řadu testů, které se staly vzorem dalších předpisů.

- Základní zkouškou je přesazený čelní náraz rychlostí 64 km/h, simulující srážku s protijedoucím vozidlem.
- Druhým testem je boční náraz do boku stojícího vozidla beranidlem předepsaných rozměrů a hmotnosti, náraz je uskutečněn rychlostí 50 km/h. Tato zkouška testuje pevnost dveří a odolnost vozidla, do kterého z boku narazí např. jiný automobil.



Obr. 2.8.1. Schématické znázornění bočního nárazového testu

- Dalšími testy jsou střet vozidla s chodcem a boční náraz do sloupu
- Náraz zezadu

Při testech jsou v automobilu speciální zkušební figuríny vybavené měřicími sondami pro zjištění síly nárazu, zpoždění a dalších sledovaných hodnot. Výsledky testů se vyhodnocují a podle stanovené metodiky se za každý test přidělí určitý počet bodů z metodiky Euro NCAP.



Obr. 2.8.2. Reálný výsledek čelního crash testu

Nároky na bezpečnost jsou stále vyšší a stavba prototypu a jeho následné zničení není věc levná a tak se v této oblasti hojně využívá počítačových simulací. V současné době jsou pro crash testy nejpoužívanější tři softwérové aplikace a to Pam-Crash, LS-Dyna a Abaqus. Záleží na dané automobilce, který si vybere a využívá.

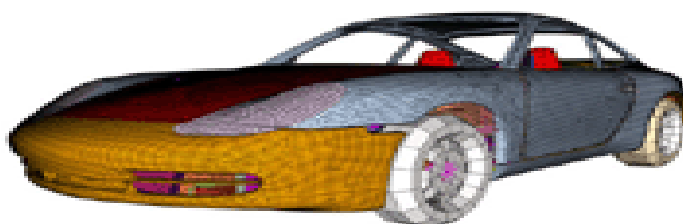
Výhodou systému PAM CRASH je návaznost na systém PAM STAMP 2G, příslušným softwarem pro simulace plošného tváření např. hlubokého tažení nebo lokálních ztenčení.



Obr. 2.8.3. Porovnání simulované a skutečné deformace vozidla po srážce

- Simulace crash-testů

Vlastní simulace je provedena metodou konečných prvků. Tato simulace je prováděna na jednotlivých částech vozu nebo na voze celém. Je tedy potřeba vytvořit síť konečných prvků a na ni zadat okrajové podmínky. To znamená vymodelovat auto a bariéru, určit kontaktní plochy, namodelovat palivo v nádrži, figuríny atd. Otázka crashů je velmi problematická a neustálá snaha o zvýšení bezpečnosti žene vývoj v této oblasti kupředu.



Obr.2.8.4. Model vozidla pro simulaci.

- Fyzikální stránka problému

Vůz se pohybuje rychlostí 64km/hod proti bariéře do které narazí, zdeformuje se a odrazí se od ní zpět. Od doby kdy vůz narazí do bariéry a odrazí se zpět, uplyne asi 0,1 vteřiny. Jde tedy o děj opravdu rychlý. Celý náraz je o energii, přesněji kinetické energii. Kinetická energie je dána

hmotností (m -mass) a rychlostí (v -velocity). Přesněji takto $E=1/2mv^2$. Jde tedy o polovinu hmotnosti a rychlost je na druhou. To znamená, že rozdíl kinetických energií při nárazu 50km/hod a 100km/hod není dvojnásobný, ale čtyřnásobný. Tedy kinetická energie je čtyřikrát vyšší.

3. Experimentální část diplomové práce

3.1. Cíle experimentálního měření

Na základě požadavků zadavatele diplomové práce ŠKODA AUTO a.s. bylo cílem předkládané diplomové práce zjistit změnu užitných mechanických vlastností vysokopevnostních plechů DOCOL 1200 a DP 980, které jsou používány ve stavbě karoserie. Tyto materiály jsou využívány k výrobě bezpečnostních vyztužujících výlisků a vykazují tzv. BH efekt.

Pro zjištění základních mechanických hodnot testovaných materiálů byla provedena statická zkouška tahem. Na vzorcích určených pro statickou zkoušku tahem byl dále zkoumán vliv tepelného zatížení (BH efekt) při různých stavech předdeformace.

Plastické vlastnosti testovaných materiálů pro různé stavy napjatosti byly hodnoceny pomocí křivek mezních přetvoření. Tyto charakteristiky se zjišťovaly pro základní materiál za vyšší rychlosti deformace (dopadová rychlost tažníku $v = 17,78$ m/s), která odpovídá rychlosti čelního crash testu dle metody NCAP. Podobně jakou u statické zkoušky se následně zjišťovala změna plastických vlastností po tepelném ovlivnění materiálu. Pro komplexní vyhodnocení testů se také zkoumala kombinace historie tváření (předdeformace plechu) a BH efektu na výsledné plastické vlastnosti plechu. Jednotlivé vzorky byly tedy podrobeny předdeformaci za běžných rychlostí deformace, pak tepelnému zatížení a posléze se opět deformovaly vyšší rychlostí deformace až do vzniku trhliny.

KMP získané při vyšších rychlostech deformace mají význam především pro konstruktéry zabývající se chováním automobilů při rázovém (destrukčním) zatížení. Z hlediska výsledných užitných vlastností

vyztužujících dílů je potřeba znát nejen základní charakteristiky materiálu při daných rychlostních podmínkách, ale též materiálu, který je již ovlivněn, např. předchozí deformací nebo tepelným zpracováním (BH efekt). Ze znalosti vlivu předdeformace na následné chování materiálu při vyšších deformačních rychlostech bude možné ovlivnit, ve vztahu k jednotlivým dílům, tvar a použitou technologii výroby výlisku tak, aby výsledné vlastnosti splňovaly nejen požadavky jako je funkčnost, ale i hlediska celkové bezpečnosti automobilu. Každý díl tedy ovlivňuje tuhost a bezpečnost celého vozu. Díly z vysokopevnostních materiálů (výztuhy sloupků, prahy apod.) mají na bezpečnost vozidla rozhodující vliv. Sledování velikosti mezní deformace na tvarových vzorcích při vyšších rychlostech deformace, na kterých již byla vytvořena předdeformace určité velikosti a smyslu, získáme v jistém slova smyslu údaje o „znehodnocení“ materiálu vlivem výroby výlisku. Vliv předdeformace je popsán v kap. 3.5.

Z podkladů takto získaných výsledků a při znalosti technologických postupů je podpořena schopnost učinit postupy ke zvýšení bezpečnosti celé karoserie.

- **Materiály použité pro experimentální část**

Materiály použité pro experimentální testování byly voleny s ohledem na požadavky zadavatele DP Škoda Auto a.s. Jedná se dva vysokopevnostní materiály používané pro výrobu výztuh prahů automobilu:

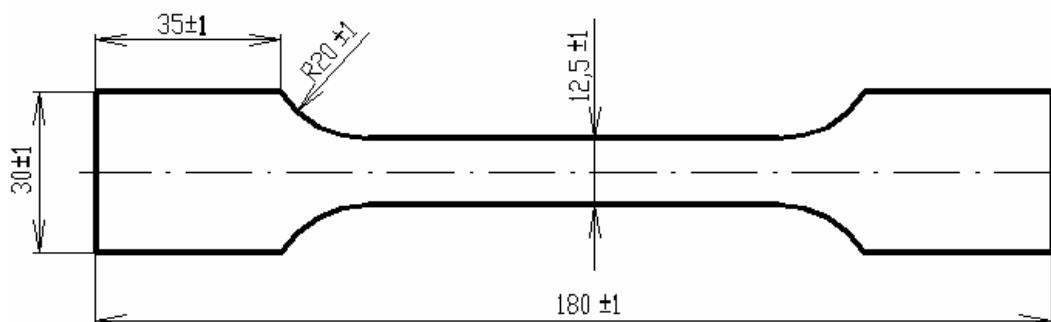
- Ø **DOCOL1200** (označení dle firmy SSAB Swedish Steel) - jmenovitá tloušťka 2 mm (skutečná tloušťka 1,96 mm)
- Ø **DP980** (označení dle firmy ThyssenKrupp Stahl) - jmenovitá tloušťka 1,4 mm (skutečná tloušťka 1,38 mm).

U těchto materiálů byla provedena měření statické zkoušky tahem (ČSN EN 10002-1) a diagramů mezních přetvoření za vysokých rychlostí deformace při různých podmínkách měření, které jsou tématem celé práce.

3.2. Zjištění základních mechanických hodnot materiálů

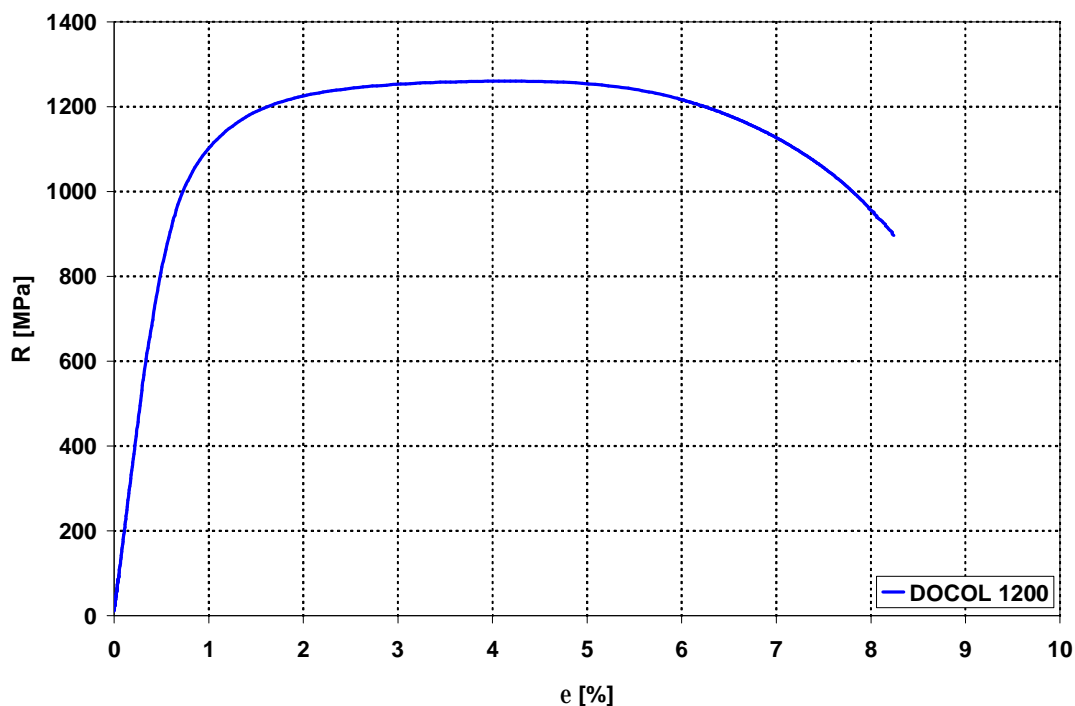
Základní materiálové charakteristiky testovaných materiálů byly stanoveny statickou zkouškou tahem. Jednalo se o klasický průběh zkoušky dle normy ČSN EN 10002-1.

Normalizované vzorky pro zkoušku jednoosým tahem (viz. obr. 3.2.1.) byly odebírány ve směru válcování (0°) metodou dělení vodním paprskem s abrazivem. Dodatečná úprava vzorků spočívala v obroušení otřepů řezných hran tyček k čemuž se použila magnetická kotoučová bruska. Statická zkouška tahem byla provedena na stroji TIRAtest 2300 s použitím vyhodnocení dat pomocí software Labtest 4.01. a použitím programového systému, který vyhodnotí potřebné základní charakteristiky ($R_{p0,2}$, R_m , A_{50mm} , A_g). Délka měřeného úseku tedy byla 50 mm (A_{50mm}).



Obr. 3.2.1. Rozměry vzorku pro zkoušku tahem dle normy ČSN EN 10002-1

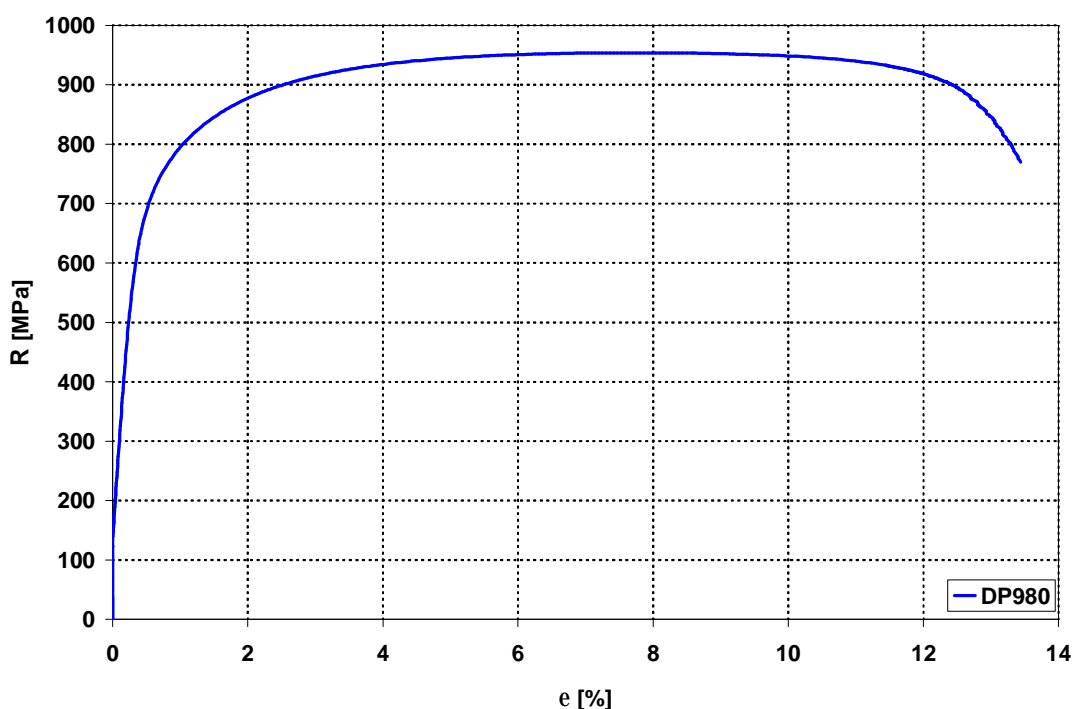
Výsledky měření statické zkoušky tahem pro oba testované materiály jsou zpracovány formou tabulek (Tab. 1 a Tab.2), kde jsou uvedeny průměrné hodnoty sledovaných veličin spolu s výběrovou směrodatnou odchylkou. Grafické znázornění výsledků statické zkoušky tahem pro oba materiály je zaznamenáno na obr.3.2.2. a obr. 3.2.3. Kompletní výsledky jednotlivých zkoušek jsou zaznamenány ve výstupních protokolech měření viz příloha 1 a 2.



Obr.3.2.2. Grafické znázornění výsledků statické zkoušky tahem pro materiál DOCOL 1200

Tab.č.3. Výsledky statické zkoušky tahem pro materiál DOCOL1200

Sledovaná hodnota	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Homogenní tažnost A_g [%]	Celková tažnost A_{50mm} [%]
Průměrná hodnota	1061	1261	3,5	7,7
Směrodatná odchylka výběru	14,28	3,20	0,19	0,22



Obr.3.2.3. Grafické znázornění výsledků statické zkoušky tahem pro materiál DP980

Tab.č.4. Výsledky statické zkoušky tahem pro materiál DP980

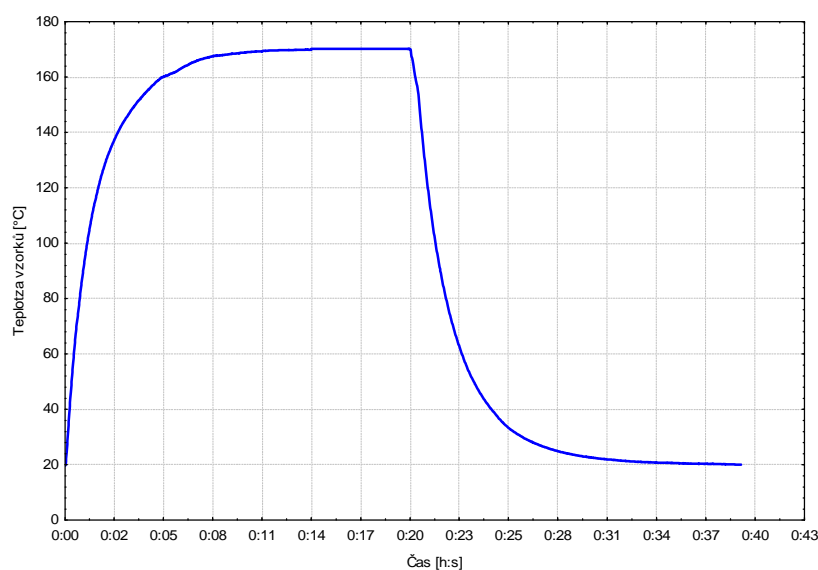
Sledovaná hodnota	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Homogenní tažnost A_g [%]	Celková tažnost A_{50mm} [%]
Průměrná hodnota	707	954	7,1	13,0
Směrodatná odchylka výběru	4,15	3,70	0,16	0,14

3.3. Určení vlivu BH efektu při jednoosém zatěžování

Vliv tepelného zatížení na změnu mechanických vlastností (BH efekt) pro jednoosý stav napjatosti byl určován pomocí statické zkoušky tahem na dvou typech vzorků. U první sady vzorků se určoval vliv BH efektu pouze pro nedeformovaný materiál a u druhé sady vzorků se určoval vliv BH efektu na

vzorcích plechu, které byly podrobeny před tepelným zatížením deformaci na stanovenou velikost. Spolu se vzorky pro statickou zkoušku tahem tak vznikly 3 skupiny vzorků s označením:

- **S** – vzorek bez předdeformace a bez tepelného zatížení
- **BH** - vzorek bez předdeformace s následným tepelným zatížením
- **BHd** – vzorek s předdeformací o velikosti $\varepsilon = 1\%$ a následným tepelným zatížením dle cyklu uvedeného na obr. 3.3.1.).



Obr.3.3.1. Náběhový průběh teploty vzorků při vypalování

Pro zjištění BH efektu byly vzorky plechu podrobeny tepelnému cyklu (170°C a doba výdrže 20 min. viz obr. 3.3.1.). Následovalo měření pomocí statické zkoušky tahem pro každý vzorek za stejných podmínek a zjištěny mechanické hodnoty takto tepelně ovlivněného materiálu. Rozdíl meze kluzu tepelně ovlivněného plechu (skupina označována jako BH) a základního materiálu (skupina označována jako S) je velikost BH efektu v tabulkách označovaného jako BH0.

Pro určení vlivu předdeformace na BH efekt byla volena hodnota předdeformace $\varepsilon = 1\%$. Tuto hodnotu jsme stanovili na základě výsledků velikosti homogenní deformace získané ze statické zkoušky tahem nevytvrzených materiálů. Vzorky podrobené počáteční plastické deformaci $\varepsilon = 1\%$ se nechaly projít tepelným cyklem. Poté opět byla provedena statická

zkouška tahem a zjištěny změny mechanických hodnot. U tohoto typu vzorků je třeba změnu meze kluzu rozdělit na tzv. pracovní zpevnění způsobené deformací vzorku (označované jako W) a zpevnění způsobené BH efektem (označován jako BH1). Velikost BH efektu pro materiál DOCOL 1200 a DP980 je pro jednotlivé podmínky měření zachycena ve formě tabulky 5 a 6. Grafické znázornění velikosti BH efektu je vyjádřeno pomocí sloupcového grafu 1 a grafu 2. Vyjádření změny mechanických vlastností je patrné grafu 3 a grafu 4, kde jsou znázorněny průběhy statické zkoušky tahem pro jednotlivé podmínky zkoušek.

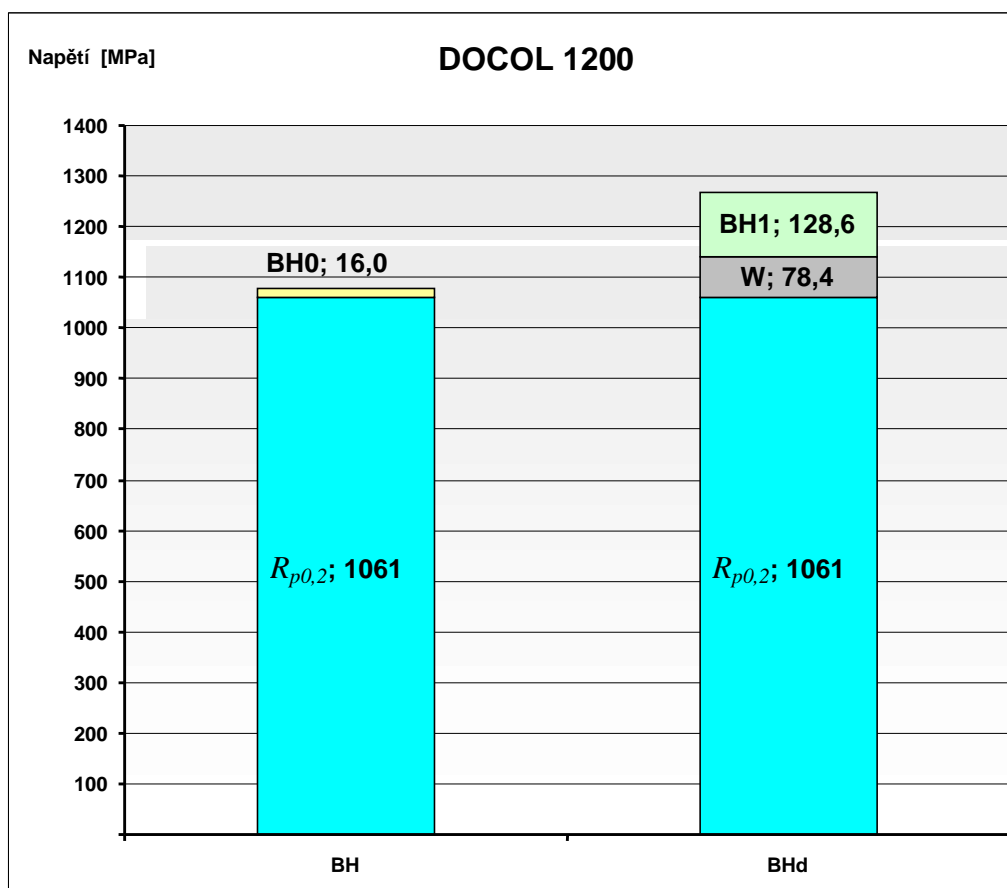
Vzhledem k malému množství dodaného plechu bylo provedeno pro každou sadu vzorků (S, BH a BHd) 5 měření u materiálu DP980 a 3 měření u materiálu DOCOL1200. Výsledky jsou znázorněny pomocí výstupních protokolů z měření statické zkoušky tahem (viz příloha 1 a 2).

- Vliv BH efektu pro materiál DOCOL1200

Podmínky měření	Mez kluzu [MPa]
S	1061
BH	1077
BHd	1268

BH efekt a pracovní zpevnění W	[MPa]
BH0	16
BH1	128,6
W	78,4

Tab.č.5. Přehled mezí kluzu pro různé podmínky měření a velikost BH efektu a pracovního zpevnění W pro materiál DOCOL 1200

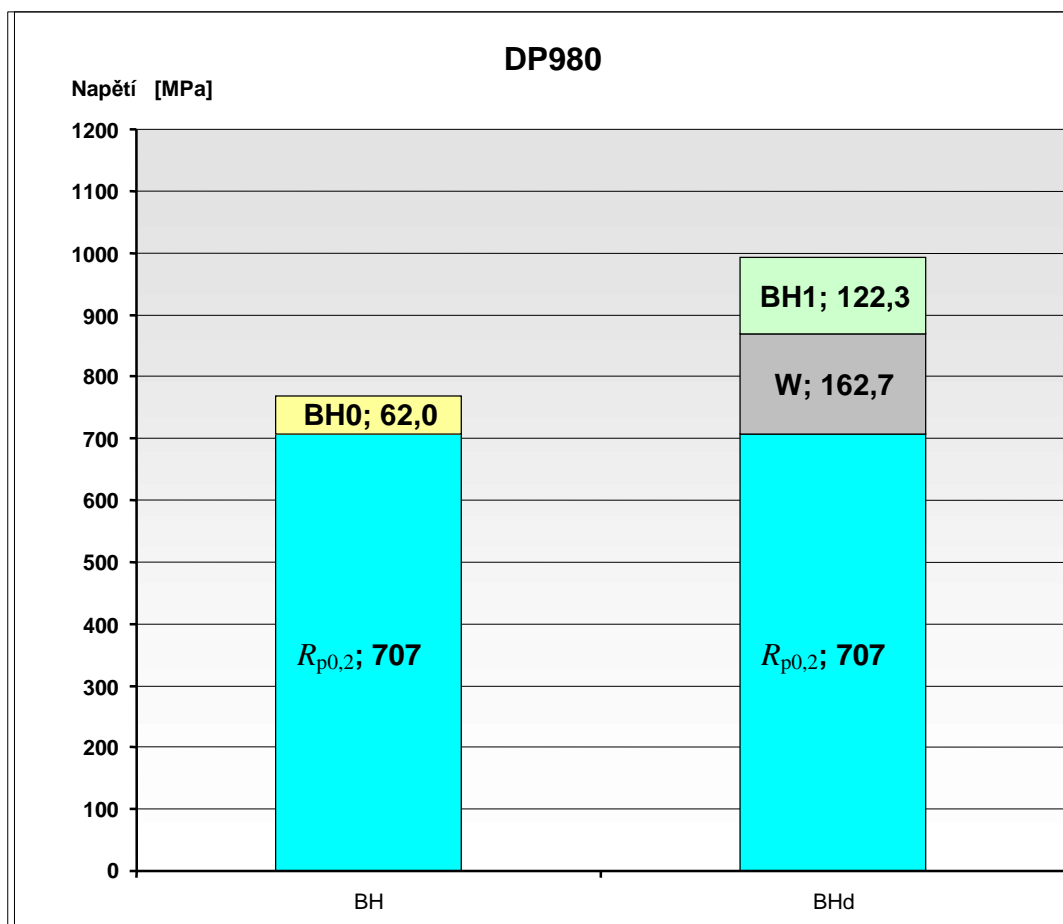


Graf. 1. Grafické znázornění BH efektu a pracovního zpevnění W

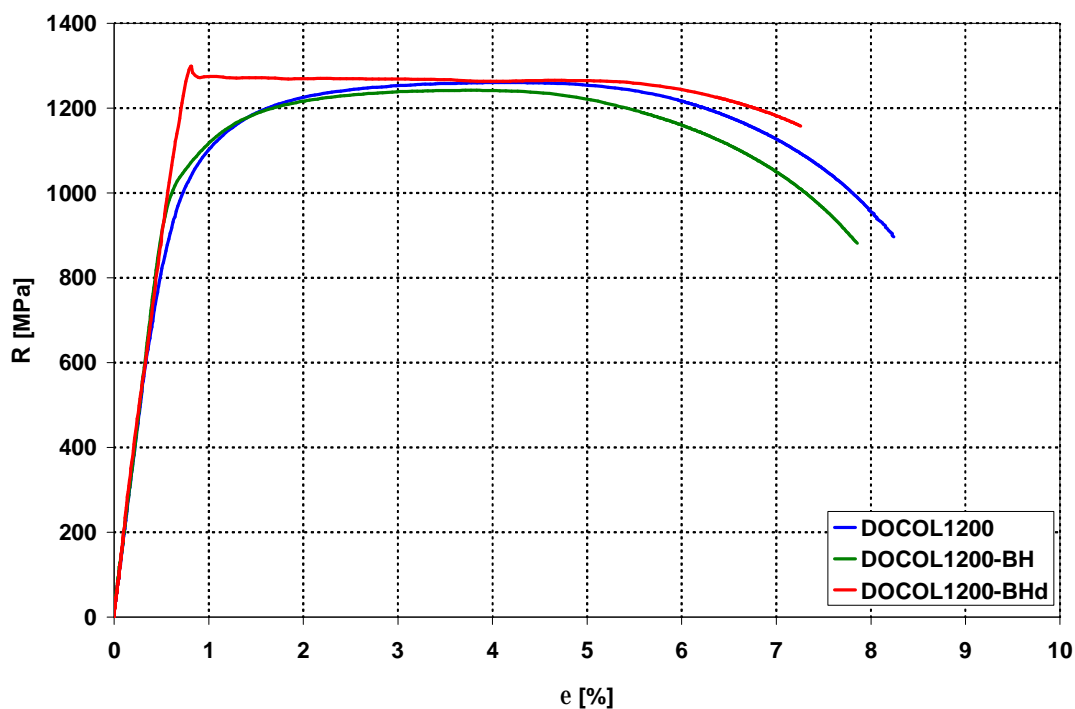
- Vliv BH efektu pro materiál DP980

Podmínky měření	Mez kluzu $R_{p0,2}$, [MPa]	BH efekt a pracovní zpevnění W	[MPa]
S	707	BH0	62
BH	769	BH1	122,3
BHd	992	W	162,7

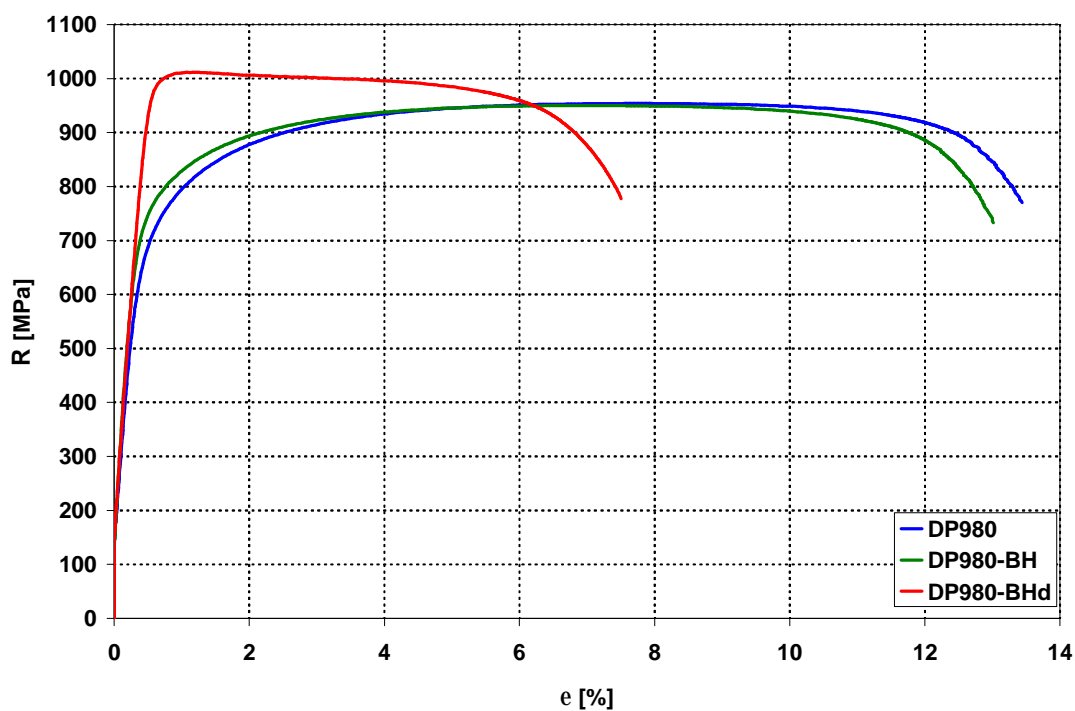
Tab.č. 6. Přehled mezí kluzu pro různé podmínky měření a velikost BH efektu a pracovního zpevnění W pro materiál DP980



Graf. 2. Grafické znázornění BH efektu a pracovního zpevnění W



Graf 3. Vyjádření změny mechanických vlastností u materiálu DOCOL 1200



Graf 4. Vyjádření změny mechanických vlastností u materiálu DP980

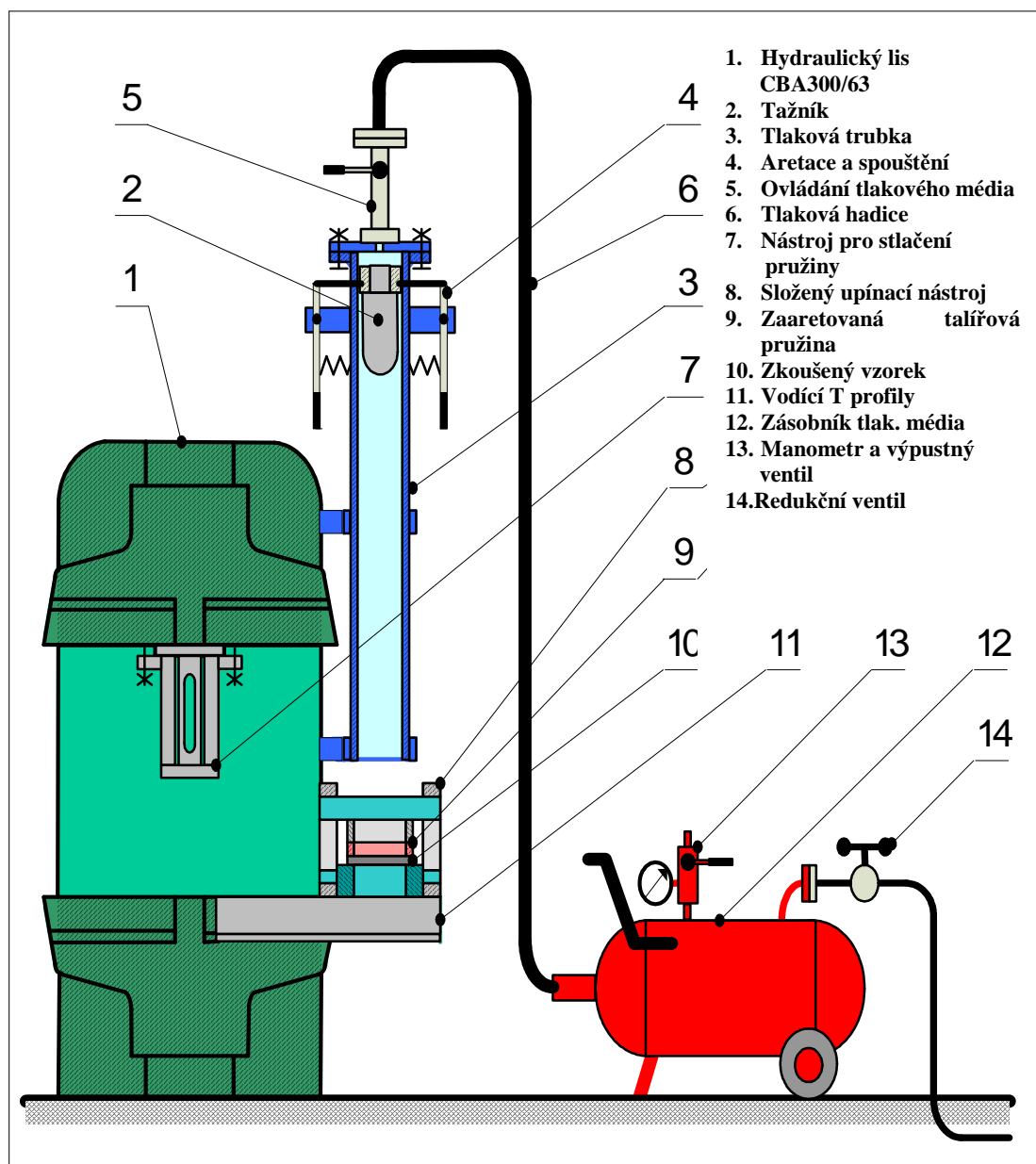
Ø Dílčí závěr

Ze zkoušek provedených pro jednoosý stav napjatosti je patrné, že velikost BH efektu pro nedeformovaný plech je výrazně vyšší u materiálu DP 980 než u materiálu DOCOL 1200. U materiálu DP 980 činí nárůst meze kluzu pro tyto podmínky měření 8,8% u materiálu DOCOL 1200 je tento nárůst pouze 1,5%. Při hodnocení vlivu předdeformace na velikost BH efektu je patrné, že absolutní velikost BH efektu je pro oba testované materiály srovnatelná. U plechu DP 980 činí BH1 efekt 123 MPa. U plechu DOCOL 1200 je velikost BH1 efektu 128 MPa. Při poměrném vyjádření vztaženém k původní mezi kluzu nedeformovaného materiálu se jedná o nárůst 17% pro materiál DP 980 a 12% u materiálu DOCOL 1200. Diskutabilní je porovnání obou hodnot BH1 efektu u deformovaných vzorků. Vzhledem k odlišným křivkám zpevnění obou testovaných materiálů není při stejné volbě velikosti předdeformace $\varepsilon = 1\%$ stejná hodnota pracovního zpevnění. U materiálu DP 980 je velikost pracovního zpevnění $W = 163$ MPa a u DOCOL 1200 je $W = 78,4$ MPa. Materiál DP 980 vykazuje ve sledovaném úseku výrazně vyšší nárůst napětí.

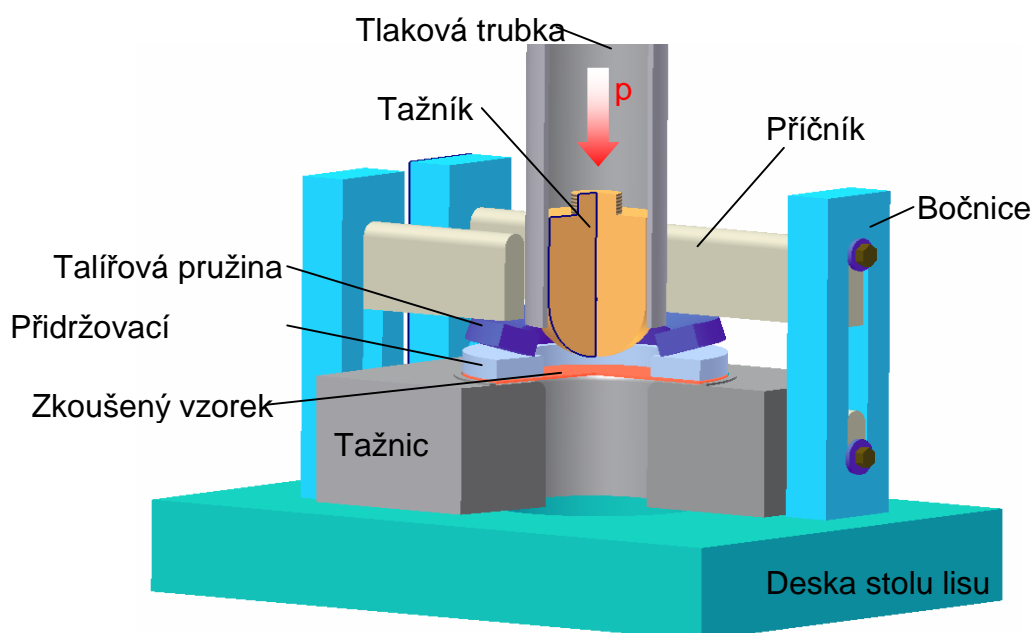
3.4. Zkušební zařízení pro měření DMP

Námi použité zkušební zařízení pro vypínání tvarových zkušebních těles se skládá ze speciálního nástroje, který je uchycen na hydraulickém dvojčinném lisu CBA 300 s adaptérem pro vysokorychlostní deformace. Při zachování požadavku na rovnoměrné pokrytí požadovaného rozsahu stavů přetvoření $m_j = -0,5$ až $m_j = 1$ v mezních hodnotách přetvoření je použito 5ti tvarů přístřihů. Šířka přístřihu „b“ se měnila v rozmezí 30 mm až 210 mm - kruhový přístřih.

Schéma zařízení a detail upínacího zařízení jsou na obr. 3.4.1 a) a 3.4.1 b).

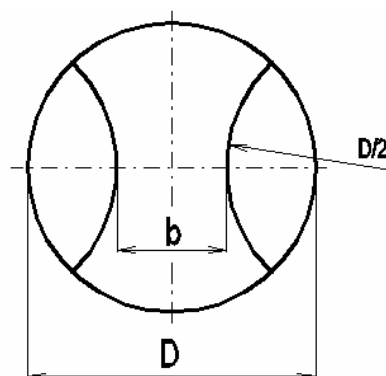


Obr 3.4.1. a) Schéma zařízení

**Obr. 3.4.1.b)** Detail upínacího zařízení

3.5. Vlastní měření DMP

Pro dosažení komplexního přehledu o stavu napjatosti byl DMP diagram sestavován z pěti deformačních stop s rozměry nejužší části vzorku od 30, 75, 105, 150 až po 210 mm (viz obr. 3.5.1.). První fáze přípravy vzorků spočívala v dělení plechů pomocí vodního paprsku s abrazivem (provedeno firmou S-plasma Liberec). Pro jednotlivé deformační stopy byly zhotoveny vždy 4 konkrétní vzorky. Mezním kritériem pro ukončení zkoušky byl vznik trhliny na testovaném vzorku. Vyhodnocení výsledku zkoušky se provádělo dle výše přijaté definice mezního stavu (vybíraly se nezasažené elementy v těsném sousedství trhliny, tedy ty, které se nacházejí na nejvyšším místě vrchlíku – element 2 na obr.2.5.2. Orientace použitých vzorků pro zhotovení DMP byla volena s ohledem na směr hlavní normální deformace j_1 , který byl shodný se směrem válcování (0°). Deformační síť byla nanесena metodou elektrolytického leptání pomocí speciálních textilních šablon. Tato metoda se volila s ohledem na to, že naleptaná síť není tak snadno náchylná k setření jako síť vytvořená barvou (např. sítotisk, gumostereotypie). Detailní pohled na použitou deformační síť je vidět na obr. 3.5.2.



Obr.3.5.1. Schéma použitého nástřihu pro vypínání kulovým tažníkem

Realizací plastického přetvoření nástřihu ve zkušebním nástroji jsou kruhové elementy přetvořeny na „elipsy“ s hlavními osami o délkách L_2 (menší rozměr) a L_1 .

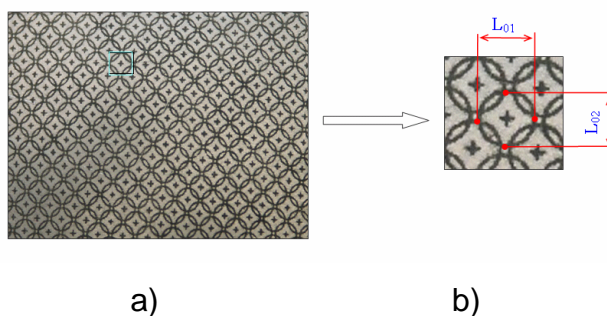
Pomocí odečtených hodnot L_1 a L_2 z vybraného elementu na deformační síť, který vyhovuje zvolené definici mezního stavu, jsou spočtena s použitím vztahu (15) hlavní normálná (mezní) přetvoření j_{1k} a j_{2k} :

$$j_{2k,1k} = \ln \frac{L_{2,1}}{L_0}, \quad (15)$$

kde L_0 rozměr výchozího elementu

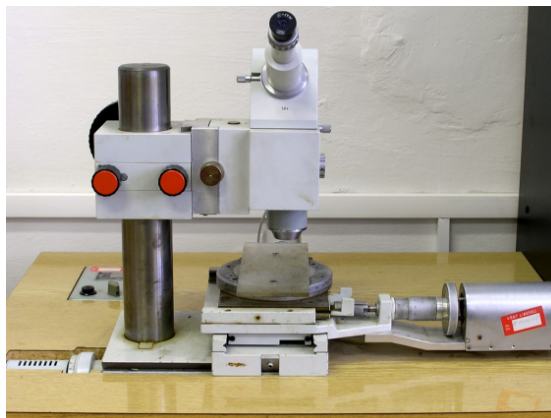
$L_{2,1}$ jsou rozměry hlavních os sledovaného elementu po přetvoření

Velikost vyleptaného elementu deformační sítě o výchozím rozměru L_0 byla určena z 10-ti náhodně vybraných nedeformovaných elementů sítě jako výběrový průměr. Měřením byla zjištěna počáteční hodnota $L_0 = 1,8214$ mm s výběrovou směrodatnou odchylkou $s = 0,0024$ mm.



Obr.3.5.2. a) deformační síť nanesená na povrch plechu, b) element plechu.

Vlastní měření rozměrů $L_{2,1}$ se provádělo na upraveném dílenském mikroskopu, který byl připojen k PC (viz obr. 3.4.4.).



Obr.3.5.3. Mikroskop pro vyhodnocování elementů deformačních sítí

Diagram mezních přetvoření (DMP) je pásmo bodů o souřadnicích $[\varphi_{2kj}, \varphi_{1kj}]$ představujících mezní přetvoření, kde φ_{2k} , resp. φ_{1k} jsou definována dle (2.7.1) jako logaritmická přetvoření, $j = 1 \dots N$ je počet bodů příslušného pásma. Toto experimentálně zjištěné pásmo mezních přetvoření (PMP) je regresní analýzou proloženo křivkou mezních přetvoření (KMP). Matematická regrese pravé i levé větve DMP byla provedena polynomičnou křivkou druhého řádu (16)

$$\varphi_{1kj} = a + b \varphi_{2kj} + c \varphi_{2kj}^2. \quad (16)$$

1) DMP zjištěný pro vysokou rychlost deformace

V tomto případě byly tvarové vzorky pro zjištění mezního stavu vystaveny deformaci při vyšší dopadové rychlosti tažníku. Uchycený vzorek v nástroji byl přemístěn pod hlaveň adaptéru a byla zajištěna jeho poloha. Volný tažník vedený a urychlovaný stlačeným vzduchem ($p=0,2$ MPa) dopadl na vzorek stanovenou rychlostí (cca 65 km/h) a tak bylo dosaženo na vzorku mezního stavu. Vzorek byl považován za dobrý jen v případě, že trhlina vznikla na vrcholu vzorku a nikoliv u paty. Dalším předpokladem bylo, aby se trhlina u úzkých vzorků začala lokalizovat uprostřed vzorku a nikoliv od okraje. Vzorky, kde trhlina vznikala od okraje byly vyřazeny. Jednalo se

pravděpodobně o chybu při přípravě vzorků, kdy nebyla dostatečně odstraněna ovlivněná oblast v okolí řezné hrany od dělení vodním paprskem.

Tento typ vzorků je nazýván v souladu s již používaným označením u statické zkoušky tahem jako **DMP - S**

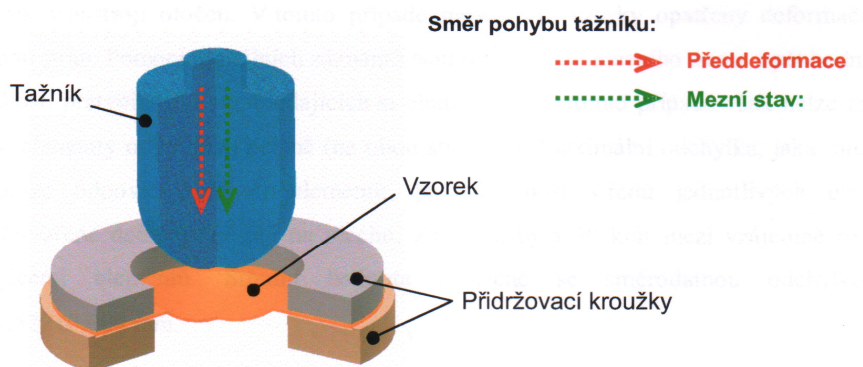
2) DMP zjištěný při vyšší rychlosti deformace s uvažováním BH efektu

U těchto vzorků bylo nejprve provedeno tepelné zpracování (170° po dobu 20 minut) k vyvození BH efektu. Postup tepelného zatížení byl volen stejně jako u vzorků určených pro statickou zkoušku tahem (náběhová křivka viz obr.3.3.1.). Takto tepelně ovlivněné vzorky byly deformovány vyšší rychlostí deformace až do vzniku trhliny stejně jako je popsáno v předchozí kapitole.

Tento typ vzorků je nazýván v souladu s již používaným označením u statické zkoušky tahem jako **DMP - BH**

3) DMP zjištěný při vyšší rychlosti deformace s uvažováním BH efektu a předdeformace vzorku

Jednalo se o skupinu vzorků vzhledem k času nejnáročnější na přípravu. Vzorky testovaných plechů byly nejprve předdeformovány standardní rychlostí deformace používanou na hydraulickém lise CBA 300/63. Směr předdeformace byl volen tak, aby byl totožný se směrem pohybu tažníku při dosažení mezního stavu při následném zatěžování vyšší rychlostí deformace. Velikost předdeformace byla stanovena s ohledem na požadavek zadavatele jako polovina průměrné hloubky tažení vrchlíku příslušné stopy při dosažení mezního stavu (dosaženého při vyšší rychlosti deformace). Hodnota této průměrné hloubky byla stanovena jako aritmetický průměr z měření maximální hloubky vrchlíku příslušné stopy u vzorků **DMP-S**. Po této předdeformaci byly vzorky vystaveny tepelnému efektu (170°C po dobu 20 minut). Poté se postupovalo stejně jako u metody **DMP-S**. Směr zatěžování při předdeformaci a při dosažení mezního stavu je patrný z obr.3.5.4.



Obr.3.5.4. Schéma smyslu předdeformace

Tento typ vzorků je nazýván v souladu s již používaným označením u statické zkoušky tahem jako **DMP - BHd**

DMP diagramy a jejich výsledky jsou znázorněny pomocí grafů (zde vloženy jako obrázky) z programu STATISTICA v.6 a to vždy pro příslušné modelované podmínky. Naměřené hodnoty a proložené aproximační křivky jsou zde plně zaznamenány. Jednalo se o polynomické aproximace 2. stupně (parabola). Rovnice pro levou a pravou větev DMP diagramu jsou vyznačeny v každém vyobrazeném grafu. V závěru je sestaven celkový graf, porovnávající všechny aplikované podmínky, v jednom přehledném grafu.

Příslušná označení jsou:

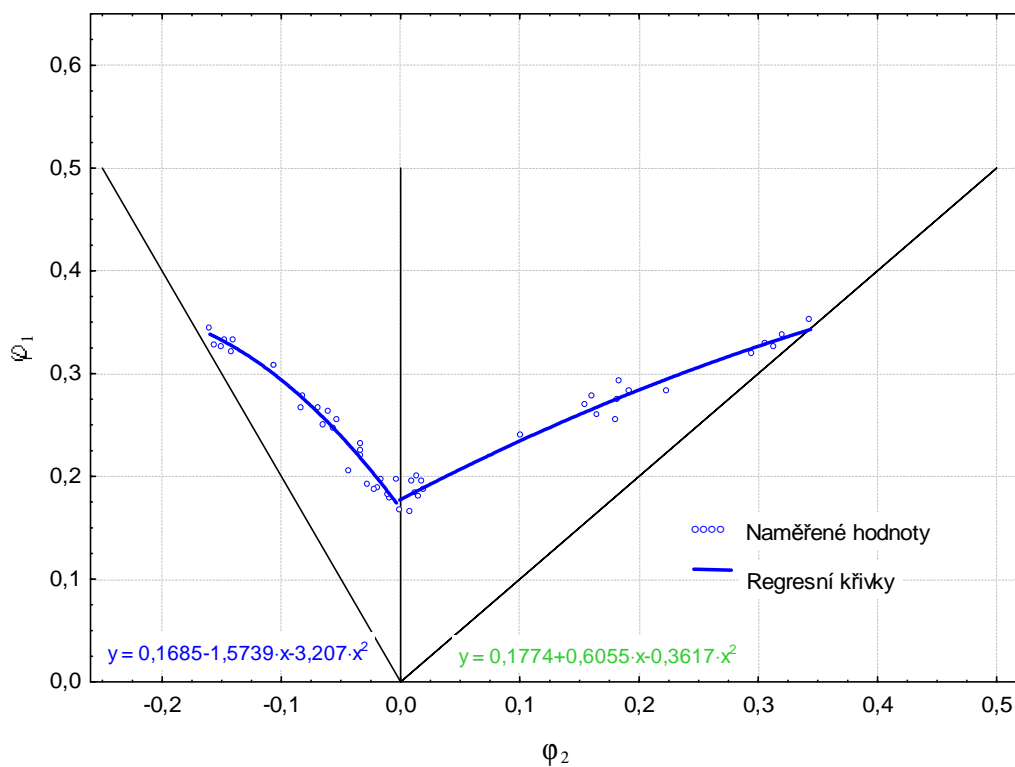
S – DMP pro vysokou rychlost

BH – DMP pro vysokou rychlost a tepelný cyklus

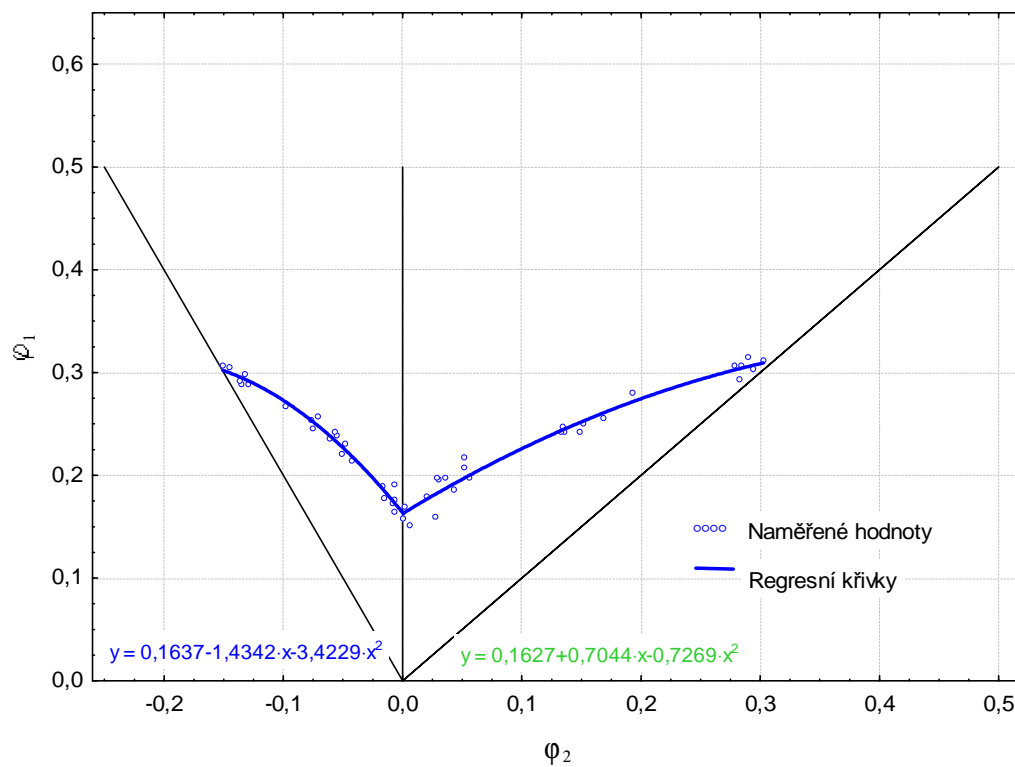
BHd – DMP pro vysokou rychlost, tepelný cyklus a předdeformaci

3.5.1. Zjištěné křivky mezních přetvoření pro materiál DOCOL1200

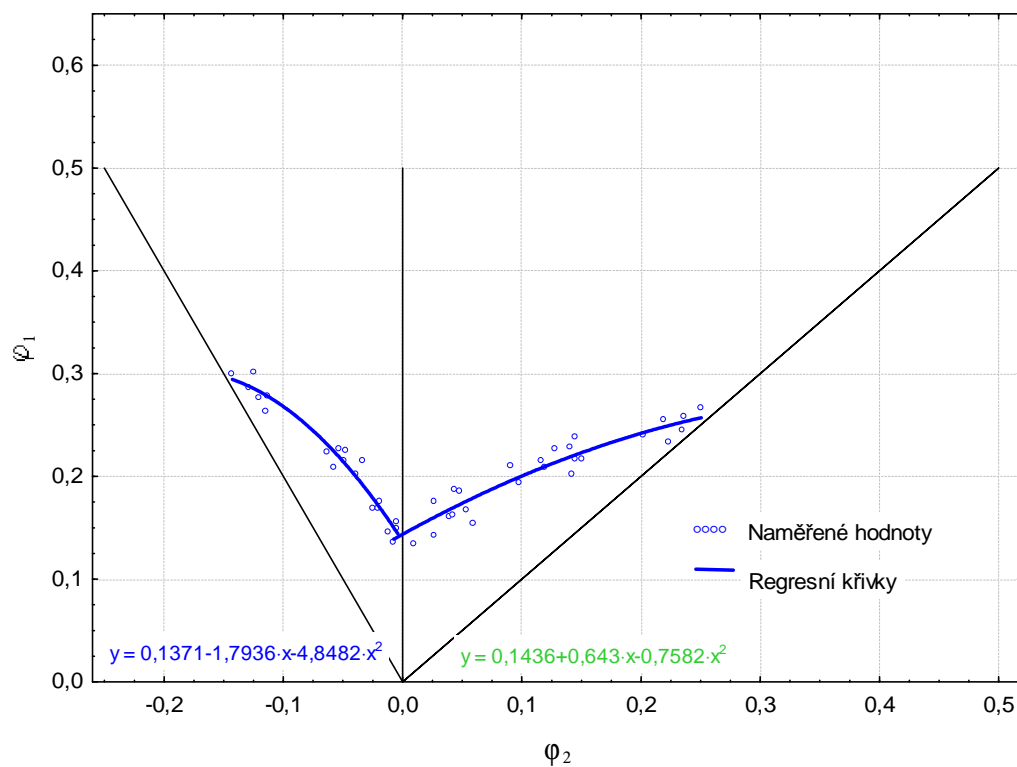
DMP – S



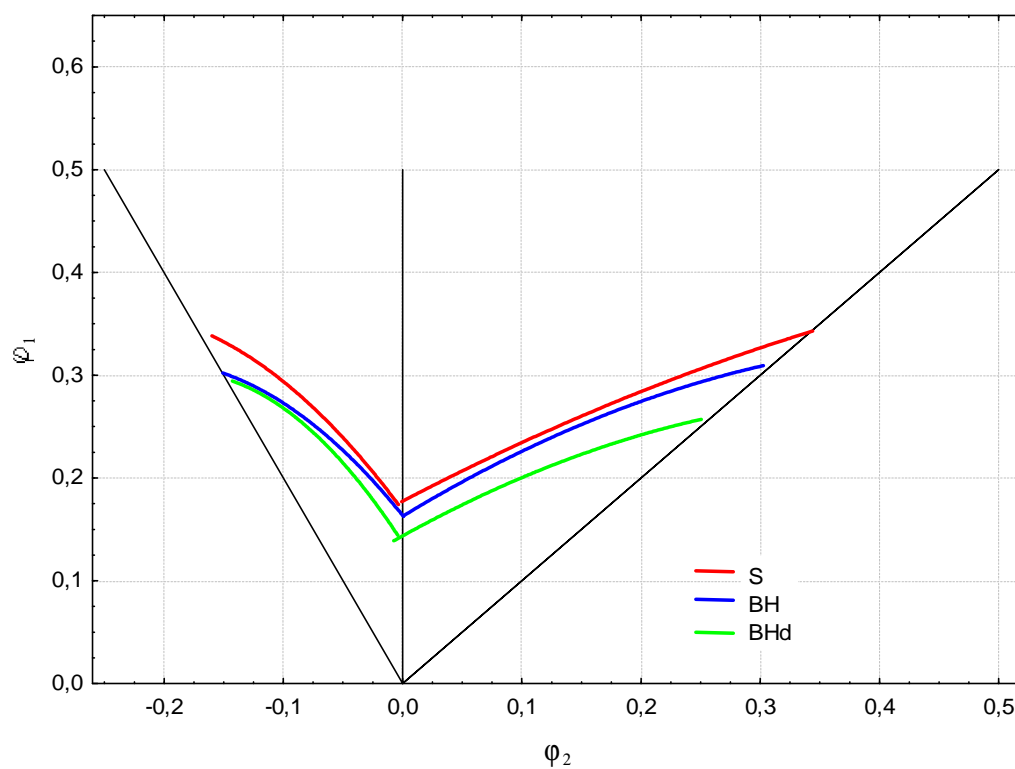
Graf 5: DMP pro základní materiál **DOCOL1200** zjištěného za vyšších rychlostí deformace - podmínky označené jako **S**

DMP – BH

Graf 6: DMP pro materiál **DOCOL1200** zjištěný při vyšší rychlosti deformace s uvažováním BH efektu - podmínky označené jako BH

DMP – BHd

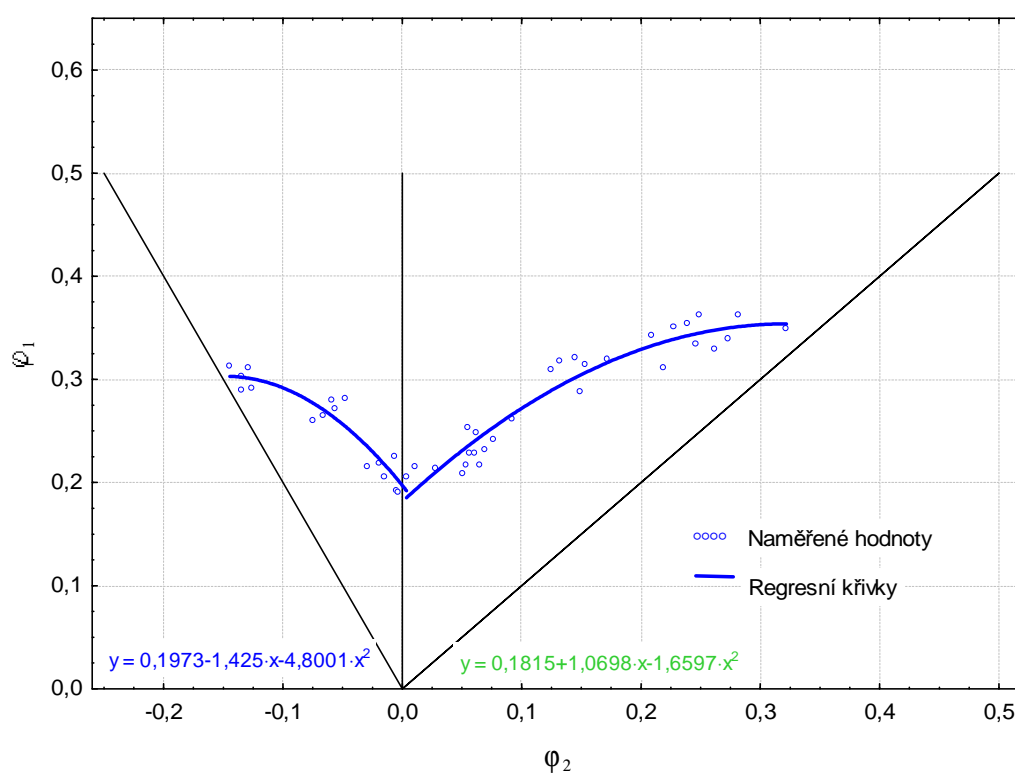
Graf 7: DMP pro materiál **DOCOL 1200** zjištěný při vyšší rychlosti deformace s uvažováním BH efektu a předdeformace vzorku - podmínky označené jako BHd

DMP – srovnání KMP pro všechny podmínky měření

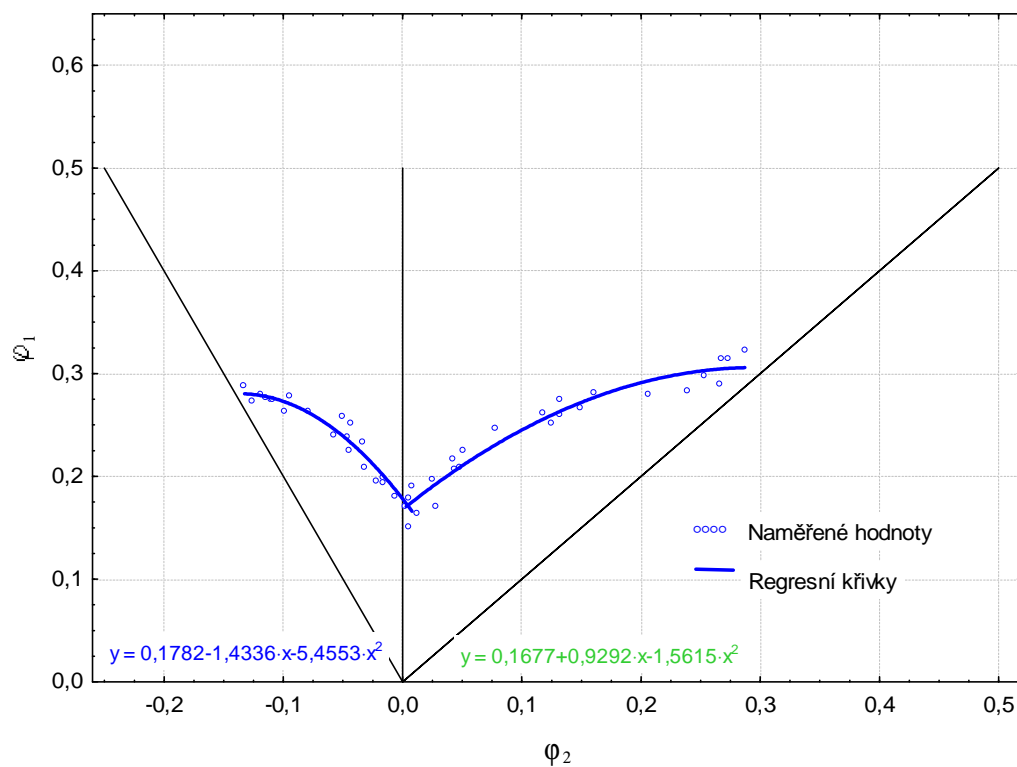
Graf 8: DMP pro materiál **DOCOL1200** a podmínky označené jako **S**, **BH** a **BHd**

3.5.2. Zjištěné křivky mezních přetvoření pro materiál DP980

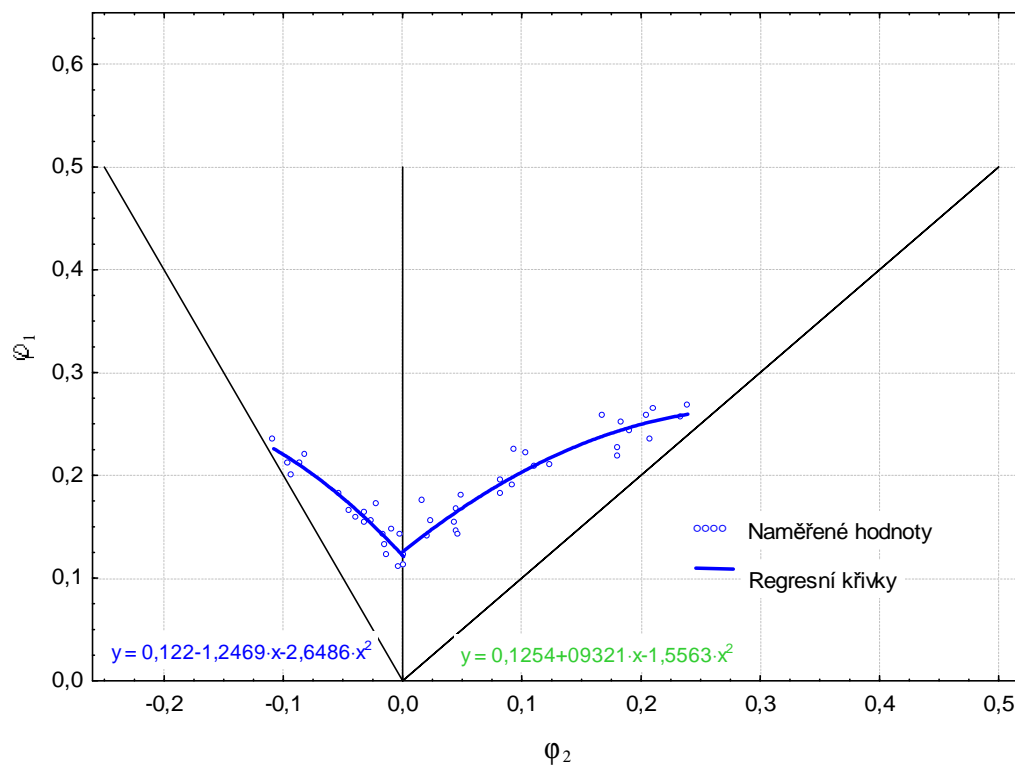
DMP – S



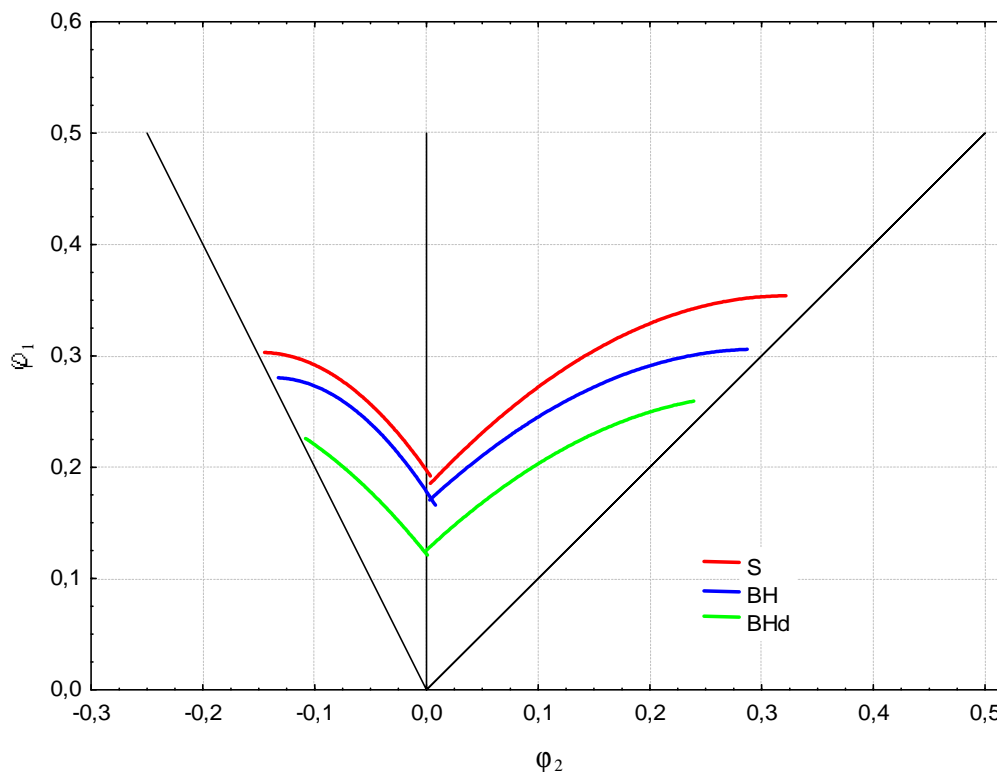
Graf 9: DMP pro základní materiál **DP 980** zjištěného za vyšších rychlostí deformace - podmínky označené jako **S**

DMP – BH

Graf 10: DMP pro materiál **DP 980** zjištěný při vyšší rychlosti deformace s uvažováním BH efektu - podmínky označené jako BH

DMP – BHd

Graf 11: DMP pro materiál **DP 980** zjištěný při vyšší rychlosti deformace s uvažováním BH efektu a předdeformace vzorku - podmínky označené jako BHd

DMP – srovnání KMP pro všechny podmínky měření**Graf 12:** DMP pro materiál **DP 980** a podmínky označené jako **S**, **BH** a **BHd****Dílčí závěry:**

Z naměřených křivek mezních přetvoření pro materiály DOCOL 1200 a DP 980 je patrné, že tepelné zatížení má vliv na polohu KMP. BH efekt u obou testovaných pevnostních materiálů snižuje plastické vlastnosti a posouvá KMP k nižším hodnotám. Tepelné zatížení plechu má větší vliv na plastické vlastnosti u materiálu DP 980, kde je výrazný pokles plastických schopností. Při tepelném zatížení materiálu DP 980 je plocha plasticity (pod křivkou KMP) nižší o cca 13% než plocha plasticity základního materiálu. Při kombinaci předdeformace a tepelného zatížení je plocha plasticity u materiálu DP 980 nižší o cca 40%. U materiálu DOCOL 1200 není tento pokles tak markantní. Při kombinaci předdeformace a tepelného zatížení je plocha plasticity u materiálu DOCOL 1200 nižší o cca 15%, což není tak dramatické jako u materiálu DP 980.

4. ZÁVĚR

Zadání DP bylo formulováno ve spolupráci s vývojovým oddělením Škoda Auto a.s. Cílem řešení předkládané diplomové práce bylo zjistit vliv tepelného zatížení na změnu mechanických vlastností testovaných vysokopevnostních materiálů DOCOL 1200 a DP 980. Jedná se o materiály používané pro vyztužující prvky karoserie a mající tak výrazný vliv na bezpečnost posádky automobilu. Z tohoto důvodu je nutné co nejkomplexněji zkoumat změny mechanických vlastností těchto materiálů v průběhu výroby, tzn. znát historii výroby a její vliv na konečné užité vlastnosti vyrobeného dílu. Chování vyrobeného dílu při případném následném zatížení např. havárii vozidla (simulované pomocí bariérových testů) je tak ovlivněno nejvíce vlastní historií výroby technologií tváření a tepelným zatížením při lakování karoserie automobilu. Z tohoto pohledu bylo voleno tedy při vypracování DP takové řešení, které umožňuje získání podrobnějších informací o chování materiálu v průběhu výroby.

Z naměřených hodnot získaných pomocí statické zkoušky tahem byly zjištěny změny mechanických vlastností pro jednotlivé testované materiály při uvažování vlivu samotného tepelného zatížení a kombinace vlivu předdeformace a tepelného zatížení. Z výsledků podrobně zpracovaných v kapitole 3.3. je patrné, že na tepelné zatížení, či kombinaci předdeformace a tepelného zatížení je náchylnější materiál DP 980. U tohoto materiálu dochází k větším změnám mechanických vlastností než u materiálu DOCOL 1200.

Plastické vlastnosti při respektování různých stavů napjatosti byly zjišťovány pomocí KMP jednotlivých materiálů a tyto KMP byly zjištěny i pro jednotlivé testované podmínky tak jako u statické zkoušky tahem. S ohledem na reálné použití těchto materiálů v konstrukci automobilu byla volena při dosažení mezního stavu vyšší rychlost deformace. I u této zkoušky bylo zjištěno, že materiál DP 980 je citlivější na tepelné zatížení než materiál DOCOL 1200. Podrobné výsledky měření ve formě DMP diagramů pro jednotlivé podmínky měření jsou přehledně zpracovány v kapitole 3.5.

Řešením DP došlo k výraznému zpřesnění materiálových dat nutných pro numerické simulace návrhu karoserie automobilu. Z výsledků je patrné, že tepelné zatížení má výrazný vliv na konečné vlastnosti vyráběného dílu a je třeba s ním počítat již při návrhu konstrukce. Dojde tak k eliminaci budoucích problémů ve fázi prototypové výroby a testování reálného automobilu. S ohledem na to, že ve většině případů jsou na počátku návrhu karoserie automobilu známa pouze základní materiálová data použitých materiálů, je třeba již při prvotním výpočtu snížit plastické vlastnosti použitých materiálů. Výsledky řešení DP ukázaly, že ultra-vysokopevné ocelové materiály (mezi které patří DOCOL 1200) jsou na BH efekt méně náchylné než vysokopevnostní materiály (mezi které patří DP 980). Z hlediska použití v konstrukci automobilu se jedná poměrně o významné zjištění. Ultra-vysokopevnostní materiály jsou používány pro nejexponovanější díly karoserie a rozhodují o bezpečnosti posádky. Je proto důležité, že jejich konečné užité vlastnosti se nemění tak dramaticky.

5. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BUCHAR, Z.NEUMANN, M.HRMA: Hodnocení tvářitelnosti svařovaných nástřihů pro stavbu karosérií. Technická univerzita v Liberci,1992
- [2] COTTRELL, A.H. Theory of dislocations. Progress in metal Physic, 1963
- [4] Tměj,J.- Mikeš, V. Teorie tváření, Liberec1990. ISBN 80-7083-011-
- [5] Vander Voort, G. F.: Metallography – Principles and Practice. Mc Graw-Hill, Inc., New York, 1984, pp. 435–461.
- [6] ČSN EN 10002-1: Zkouška tahem. Český normalizační institut, 1994
- [7] EN 10130:1991: Cold Rolled Low Carbon Steel Flat Products for Cold Forming. Technical delivery conditions. BSI, October 1991
- [8] MELOUN, M.-MILITKÝ, J.: Statistické zpracování experimentálních dat,edice PLUS, Praha, 1994
- [9] PÍŠEK, F.- Jeníček, L.- Ryš, P. Nauka o materiálu I, svazek 1. MČAV Academia
- [10] Buchar, Z. Diagramy mezních přetvoření tenkých hlubokotažných plechů Kandidátská disertační práce
- [11] Doubek P.- Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace,disertační práce, 2006
- [12] Petruželka, J.- Březina, R. Tvářitelnost kovových materiálů, VŠB, Ostrava 2001
- [13] SPIŠÁK,E.: Matematické modelovanie a simulácia technologických procesov – ťahanie, Košice 2000
- [14] TU V LIBERCI: Úvod do tváření II., výukový text, Liberec
- [15] ŠKODA AUTO, a.s.: www.skoda-auto.cz, Mladá Boleslav 4/2007
- [16] Tměj, J.:Metodika experimentálního hodnocení plechů z hlediska mezních hodnot velkých plastických deformací. VŠST Liberec 1982.
- [17] ČSN– EN 10002-1: Kovové materiály. Statická zkouška tahem,2002
- [18] Počta, A.: Základy teorie tváření kovů. SNTL, Praha 1966.
- [19] Euro NCAP, www.passivesafetytesting.com, www.euroncap.com
- [20] Tměj,J. Fyzikální podstata povrchových vrásek a způsoby jak předcházet jejich vzniku. Liberec 1987



- [21] Billy, J. Trendy vývoja ocelových plechov pre ľahké automobilové konštrukcie. In: Hutnické listy 1999, Vol 3, s 16-21.
- [22] Worldautosteel, International Iron And Steel institute, Technical Info, 2004. Dostupnosť z www.worldautosteel.org
- [23] ČSN ISO 10275. Kovové materiály Stanovení exponentu deformačního zpevnění plechů a pásů. 1995



6. SEZNAM PŘÍLOH

1. PROTOKOLY ZE STATICKÉ ZKOUŠKY TAHEM: MATERIÁL DOCOL1200.
2. PROTOKOLY ZE STATICKÉ ZKOUŠKY TAHEM: MATERIÁL DP980.



Příloha 1

1. PROTOKOLY ZE STATICKÉ ZKOUŠKY TAHEM: MATERIÁL **DOCOL1200.**



Technická univerzita v Liberci

Katedra strojírenské technologie

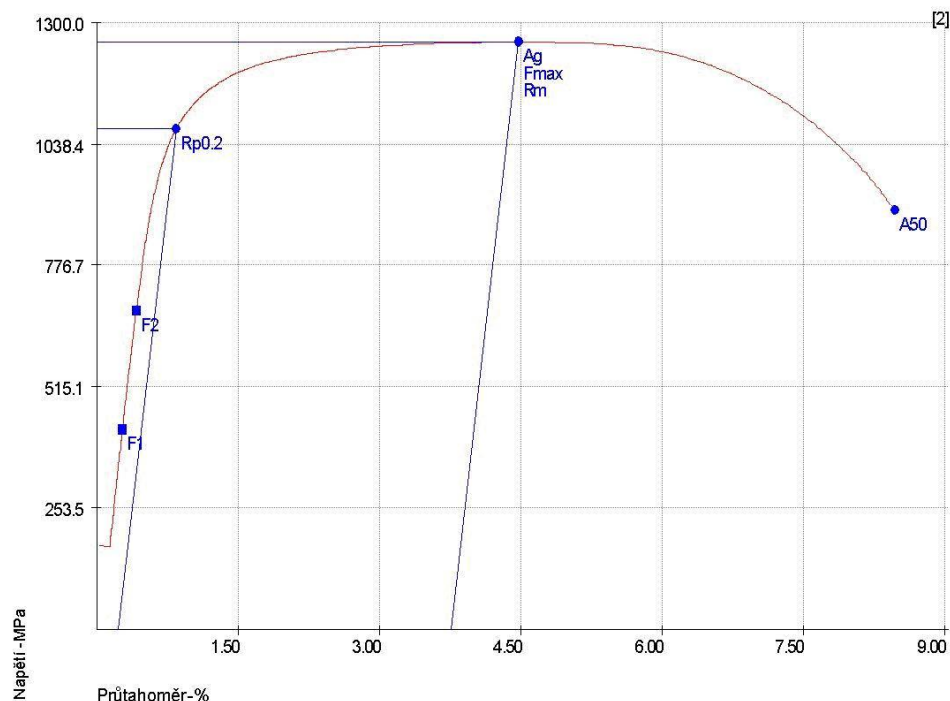
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Název materiálu: DOCOL1200 Rychlost posuvu: 10mm/min.
Směr odebrání vzorku: 0° Datum testu: 26.9.2007
Zkušební norma: ČSN EN 10 0002-1 Vypracoval: Ondřej Porkert
Podmínky měření: S :
: :
: :

Výstupní hodnoty

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50 %
1	1077	1265	3.3	7.5
2	1072	1259	3.7	7.9
3	1034	1260	3.5	7.7
x	1061	1261	3.5	7.7
s	23.30	3.20	0.19	0.22





Technická univerzita v Liberci

Katedra strojírenské technologie

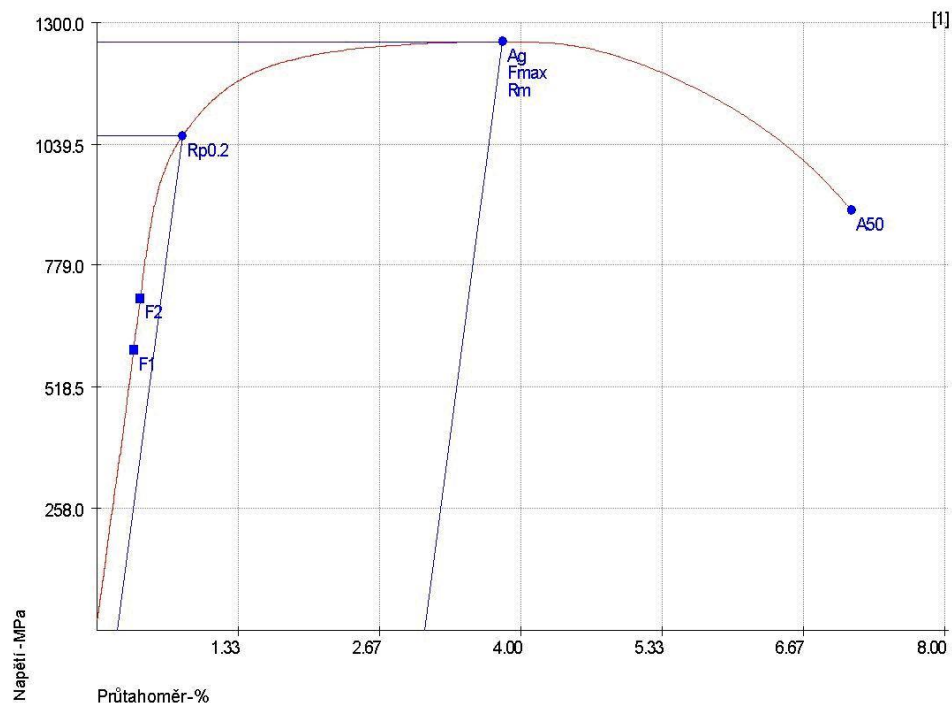
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Název materiálu: DOCOL1200 Rychlost posuvu: 10mm/min.
Směr odebrání vzorku: 0° Datum testu: 26.9.2007
Zkušební norma: ČSN EN 10 0002-1 Vypracoval: Ondřej Porkert
Podmínky měření: BH :
:
:

Výstupní hodnoty

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50 %
1	1058	1260	3.1	6.6
2	1111	1262	3.5	7.2
3	1061	1242	3.0	7.4
x	1077	1254	3.2	7.0
s	29.94	11.14	0.25	0.41





Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie

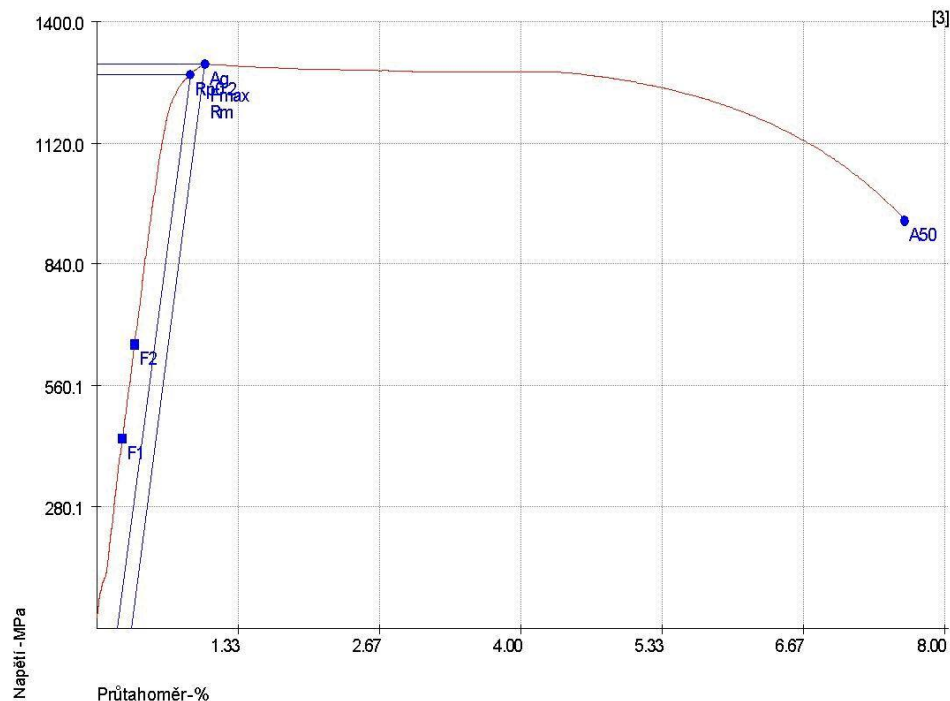
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Název materiálu:	DOCOL1200	Rychlost posuvu:	10mm/min.
Směr odebrání vzorku:	0°	Datum testu:	26.9.2007
Zkušební norma:	ČSN EN 10 0002-1	Vypracoval:	Ondřej Porkert
Podmínky měření:	BHd	:	:
:	:	:	:
:	:	:	:

Výstupní hodnoty

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50 %
1	1252	1252	0.1	7.2
2	1274	1299	0.1	8.0
3	1279	1302	0.3	7.1
x	1268	1285	0.2	7.4
s	14.28	28.18	0.14	0.48





Příloha 2

2. PROTOKOLY ZE STATICKÉ ZKOUŠKY TAHEM: MATERIÁL DP980.



Příloha 2 str.1/3

Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie

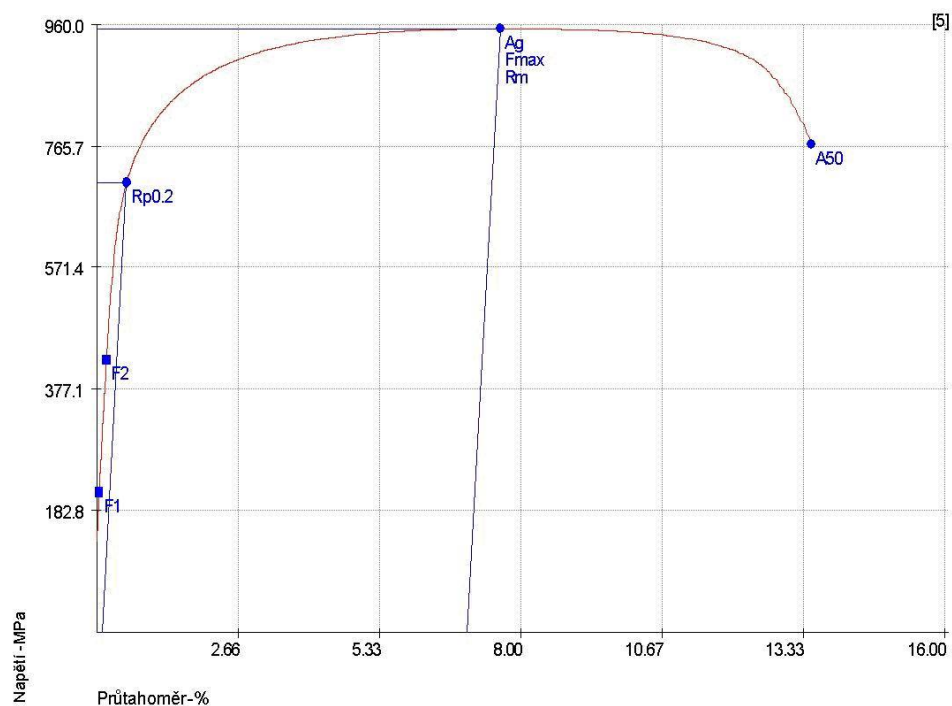
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Název materiálu :	DP980	Rychlost posuvu :	10mm/min.
Směr odebrání vzorku :	0°	Datum testu :	26.9.2007
Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1	Vypracoval :	Ondřej Porkert
Podmínky měření :	S	:	:
:	:	:	:
:	:	:	:

Výstupní hodnoty

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50 %
1	702	958	7.1	13.1
2	716	958	6.9	12.8
3	703	946	7.0	13.0
4	705	956	7.3	13.2
5	708	954	7.1	13.0
x	707	954	7.1	13.0
s	5.52	4.99	0.16	0.14





Příloha 2 str.2/3

Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie

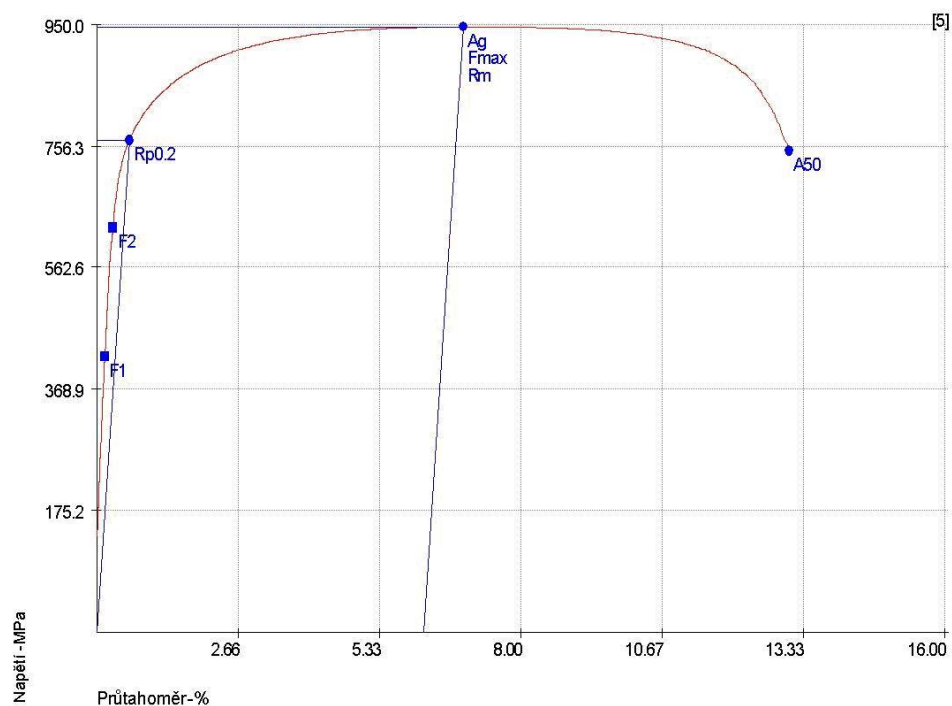
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Název materiálu :	DP980	Rychlost posuvu :	10mm/min.
Směr odebrání vzorku :	0°	Datum testu :	26.9.2007
Zkušební norma :	ČSN EN 10 0002-1	Vypracoval :	Ondřej Porkert
Podmínky měření :	BH	:	:
:	:	:	:
:	:	:	:

Výstupní hodnoty

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50 %
1	769	947	6.6	12.3
2	776	957	6.3	12.2
3	766	945	6.3	12.4
4	769	950	6.5	12.5
5	766	947	6.4	12.5
x	769	949	6.4	12.4
s	4.09	4.88	0.16	0.13





Příloha 2 str.3/3

Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie

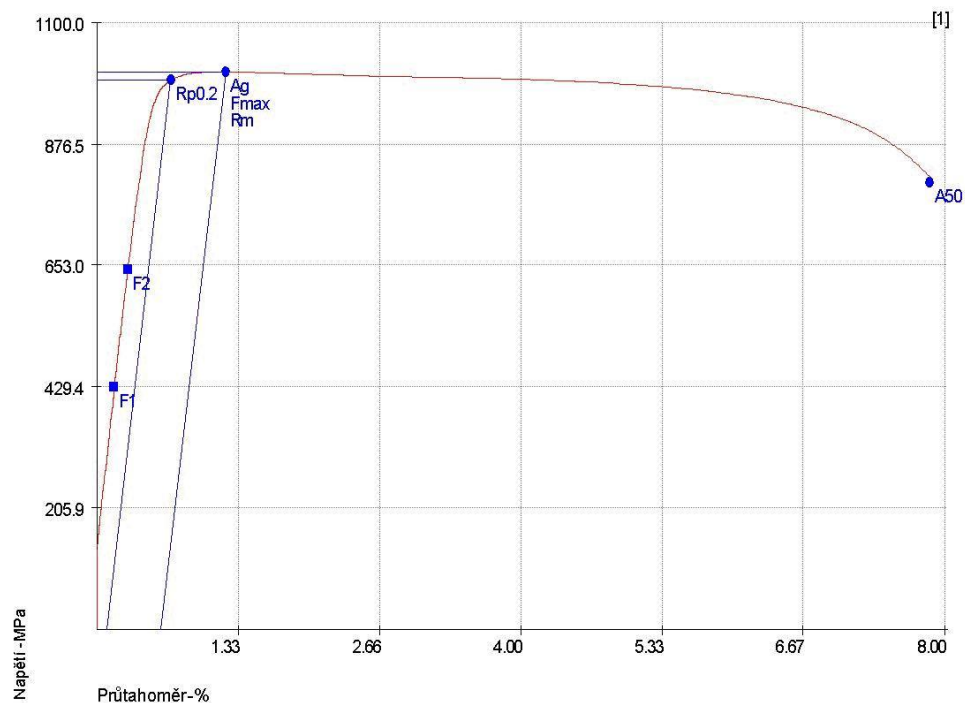
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Název materiálu:	DP980	Rychlost posuvu:	10mm/min.
Směr odebrání vzorku:	0°	Datum testu:	26.9.2007
Zkušební norma:	ČSN EN 10 0002-1	Vypracoval:	Ondřej Porkert
Podmínky měření:	BHd	:	:
:	:	:	:
:	:	:	:

Výstupní hodnoty

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50 %
1	994	1010	0.7	7.4
2	988	1004	0.7	7.2
3	988	1004	0.7	7.2
4	996	1011	0.8	7.2
5	995	1011	0.7	6.5
x	992	1008	0.7	7.1
s	4.15	3.70	0.04	0.35





PROHLÁŠENÍ

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60- školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 4. 1. 2008

Podpis:



DECLARATION

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 4. 1. 2008

Signature: